



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

Títol: Requeriments de posicionament del cotxe autònom

Titulació: Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

Autor: Marc Antoni Collell Vendrell

Director: Lluís Jofre

Data: 3 de setembre del 2018

Títol: Requeriments de posicionament del cotxe autònom

Autor: Marc Antoni Collell Vendrell

Director: Lluís Jofre Roca

Data: 3 de setembre del 2018

Resum

L'objectiu d'aquest TFG és analitzar els requeriments de posicionament del cotxe autònom i estudiar els sistemes GNSS actuals per saber si aquests complexen els requeriments necessaris per al sector del cotxe autònom.

Ha sigut necessari comprendre el sistema de posicionament global GPS, les seves limitacions i exactituds que ofereix així com el nou sistema de posicionament Galileo. En aquest treball es documenta i calcula les diferents fonts d'error que afecten al posicionament dels GNSS per saber quina és la font d'error més problemàtica i quantificar-la. A més, es detallen tècniques que ens ajudarien a millorar les exactituds en les mesures fetes per un receptor GNSS que ens podrien ser útils per el seu ús en el cotxe autònom.

Entre les diferents fonts d'error que trobem per els GNSS, el multipath és una de les més significatives ja que no es pot modelar ni predir. S'han realitzat càlculs per quantificar l'error que suposa un entorn amb multipath i s'ha fet servir un software per fer una simulació d'aquest entorn d'una manera més pràctica. El software utilitzat s'anomena Remcom i ha servit per veure de manera més visual les reflexions que pot haver en un entorn urbà i com ens afecta el retard del senyal GNSS.

Finalment, un cop analitzats les diferents tècniques per millorar l'exactitud en el posicionament, es conclourà quina seria la que millor s'adapta en el cas del cotxe autònom per tal de complir els requeriments de posicionament estudiats en els primers capítols.

Título: Requerimientos de posicionamiento del coche autónomo

Autor: Marc Antoni Collell Vendrell

Director: Lluís Jofre Roca

Data: 3 de septiembre del 2018

El objetivo de este TFG es analizar los requerimientos de posicionamiento del coche autónomo y estudiar los sistemas GNSS actuales para saber si este cumple los requerimientos necesarios para el sector del coche autónomo.

Ha sido necesario comprender el sistema de posicionamiento global GPS, sus limitaciones y exactitudes que ofrece así como el nuevo sistema de posicionamiento Galileo. En este trabajo se documenta y se calcula las diferentes fuentes de error que afectan al posicionamiento de los GNSS para saber cuál es la fuente de error más problemática y cuantificarla. Además, se detallan técnicas que nos ayudarían a mejorar las exactitudes en las medidas realizadas por un receptor GNSS que nos podrían ser útiles para su uso en un coche autónomo.

Entre las diferentes fuentes de error que encontramos por los GNSS, el multipath es una de las más significativas ya que no se puede modelar ni predecir. Se han realizado cálculos para cuantificar el error que supone un entorno con multipath y se ha utilizado un software para hacer una simulación de este entorno de una manera más práctica. El software utilizado se llama REMCOM y nos ha servido para ver de manera más visual las reflexiones que podemos tener en un entorno urbano y cómo nos afecta el retardo de la señal GNSS.

Finalmente, una vez analizadas las diferentes técnicas para mejorar la exactitud en el posicionamiento, veremos cuál sería la que mejor se adapta en el caso del coche autónomo para cumplir los requerimientos de posicionamiento estudiados en los primeros capítulos.

Title: Requirements of positioning for autonomous cars

Author: Marc Antoni Collell Vendrell

Director: Lluís Jofre Roca

Date: September 3rd 2018

Overview

The objective of this TFG is to analyse the requirements of positioning for autonomous cars and to study the current GNSS systems to know if these fulfil the requirements for this sector.

It has been necessary to understand the global GPS positioning system, its limitations and the accuracies it offers as well as the Galileo positioning system. In this project, the different sources of error that affect the positioning of the GNSS are documented and calculated to know which is the most problematic error source and quantify it. In order to help the positioning for autonomous cars, techniques that would help us to improve accuracy in the measurements made by a GNSS receiver are detailed.

Among the different sources of error found for GNSS, the multipath is one of the most significant because it can not be modelled or predicted. Calculations have been made to quantify the error that involves a multipath environment and we have used software to simulate this environment in a more practical way. The software used is called Remcom and has helped us to see in a more visual way the reflections that we can have in an urban environment and how it affects the delay of the GNSS signal.

Finally, once the different techniques have been analysed to improve the accuracy in the positioning, we will see the one that best adapts in the case of the autonomous car in order to fulfil the requirements of positioning studied in the first chapters.

Aquest TFG va dedicat a totes les persones que m'han ajudat a arribar fins aquí. A Climent, el meu professor i tutor de matemàtiques i tecnologia de batxillerat, el millor professor que he tingut i tindrè, va ser qui em va animar a estudiar aquesta carrera i em va motivar per fer-ho, va veure en mi el que jo no era capaç de veure.

Als meus companys de la feina, per haver-me aguantat tots aquests mesos, m'han donat molts consells i sobre tot m'han sabut escoltar. A Kevin, Christian i Kushal, que han passat moltes hores ajudant-me amb els softwares quan no tenien perquè fer-ho i a Juan Carles i Adrià que m'han prestat els seus ordinadors quan el meu es va espatllar.

Al meu tutor del projecte Lluís Jofre, per la seva ajuda i dedicació al llarg d'aquest treball, ha sabut transmetre'm els coneixements i m'ha motivat cada dia que he anat a consultes, m'ha fet gaudir d'aquest projecte i sense ell no hagués sigut capaç de fer-lo.

Als meus pares, el meu pare per la seva fermesa per tal de que no hem desviés mai del camí i a la meva mare per la seva comprensió, amor i confiança que ha tingut sempre amb mi. I per últim a la meva àvia Manuela, siguis on siguis sé que estaràs orgullosa de mi.

Índex d'acrònims

AltBOC	Alternative BOC modulation
BOC	Binary offset carrier modulation
CBOC	Composite BOC
CEP	Circular Error Probable
CS	Commercial Service
DF	Dual Frequency
DGPS	Diferential Global Positioning System
DOP	Dilution of Precision
EC	European Comision
EEUU	Estats Units
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EU	European Union
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
HPE	Horizontal Position Error
INS	Inertial Navigation System
IMU	Inertial Measurement Unit
LiDAR:	Light Detection And Ranging
MS	Master Station
OS	Open Service
RADAR	Radio Detection And Ranging
RMS	Root Mean Square
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SF	Single Frequency
SoL	Safety of Life
SPS	Standard Positioning Service
TFG	Treball Final de Grau
UPC	Unversitat Politècnica de Catalunya
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
VPE	Vertical Position Error
UERE	User Equivalent Range Error
UHF	Ultra High Frequency

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. El cotxe autònom.....	4
2. EL COTXE AUTÒNOM I EL SEU ENTORN.....	7
2.1. Sensors de posicionament del cotxe autònom.....	7
2.1.1. Global Positioning System(GPS)+Inertial Measurement Unit (IMU)	8
2.1.2. LiDAR	8
2.1.3. Càmeres òptiques	9
2.1.4. RADAR	10
2.1.5. Ultrasons.....	10
2.2. Distàncies per a una conducció autònoma segura	11
2.2.1. Distància frontal de seguretat mínima.....	11
2.2.2. Separació lateral.....	20
3. SISTEMES DE NAVEGACIÓ PER SATÈL·LIT: GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS).....	22
3.1 Introducció	22
3.2 Composició i funcionament del sistema.....	22
3.2.1 Segments.....	22
3.2.2 Funcionament d'un sistema GNSS	24
3.2.3 Fonts d'error	29
3.3 Sistemes GNSS existents	29
3.3.1 Global Positioning System (GPS)	29
3.3.2 GALILEO: el nou sistema europeu de navegació	36
4. Càlcul d'errors de posicionament.....	41
4.1 Errors dependents del satèl·lit.....	43
4.1.1 Error del rellotge del satèl·lit.....	43
4.1.2 Error en els paràmetres orbitals (efemèrides transmeses)	43
4.2 Errors per retard de propagació	45
4.2.1 Retard Ionosfèric	45
4.2.2 Retard Troposfèric.....	48
4.3 Errors degut al multipath	51
4.3.1 Càlcul d'error per multipath	51
4.3.2 Simulació de l'error per multipath amb REMCOM	62
4.4 Errors en el receptor	67
4.4.1 Error del rellotge del receptor	67
4.4.2 Soroll en el receptor	67

5.	TÈCNIQUES DE REDUCCIÓ DELS ERRORS DE POSICIONAMENT ..	71
5.1	Tècniques diferencials	71
5.1.1	Differential GPS (DGPS)	71
5.1.2	Real-Time Kinematic (RTK).....	72
5.2	Doble freqüència i multi-constel·lació	73
5.3	Satellite-Based Augmentation System (SBAS)	74
5.3.1	EGNOS.....	75
5.4	Projecte InLANE.....	77
5.4.1	GNSS + EGNOS	78
5.4.2	Sensors IMU low-cost.....	78
5.4.3	Visió computacional.....	78
6.	CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS	80
6.1	Conclusions	80
6.2	Treballs futurs.....	81
7.	ANNEX A: GPS	82
9.1	Segments.....	82
9.2	Taula resum.....	85
9.3	Indicadors de precisió	86
9.3.1	User Equivalent Range Error (UERE)	86
9.3.2	Dilution of Precision (DOP).....	87
9.3.3	Exactitud vs Precisió	87
9.4	SBAS-EGNOS.....	88
8.	ANNEX B: GALILEO	90
9.	ANNEX C: <i>SLDEMO_ABSBRAKE</i>	92
10.	ANNEX D: REMCOM	94
11.	CAPÍTOL 9. BIBLIOGRAFIA	97

Índex de figures

Figura 1.1: Sistema del cotxe autònom [5]	6
Figura 2.1: Sensors del cotxe autònom [28]	7
Figura 2.2: Distància de seguretat.....	11
Figura 2.3: Distància de reacció	12
Figura 2.4: Gràfica de la distància recorreguda en funció del temps de reacció	12
Figura 2.5: Distància de frenada	13
Figura 2.6: Escenari en cas de frenada d'emergència	14
Figura 2.7: Gràfica de la distància de frenada d'un cotxe circulant a 45 km/h. L'eix Y representa la distància de frenada en metres mentre que l'eix X indica el temps en segons.....	16
Figura 2.8: Gràfica de la distància de seguretat mínima per a cotxes autònoms i no autònoms en funció de la velocitat en cas de frenada d'emergència ...	18
Figura 2.9: Escenari en cas de que el cotxe de davant tingui un accident	18
Figura 2.10: Gràfica comparativa de les distàncies de seguretat mínimes entre els cotxes no autònoms i autònoms en funció de la distància en cas de frenat en sec	19
Figura 2.11: Amplada d'un carril i precisió GPS estàndard	20
Figura 2.12: Separació lateral per cotxes autònoms	21
Figura 2.13: Separació lateral per a cotxes i camions autònom	21
Figura 3.1: Segments GNSS [29]	24
Figura 3.2: Esfera de radi R que forma un satèl·lit	25
Figura 3.3: Intersecció entre dues esferes generades per dos satèl·lits	26
Figura 3.4: Intersecció entre tres esferes generades per tres satèl·lits	26
Figura 3.5: Intersecció entre quatre esferes generades per quatre satèl·lits....	27
Figura 3.6: Càlcul de la posició d'un receptor GNSS	27
Figura 3.7: Components senyal GPS	30
Figura 3.8: Autocorrelació i correlació creuada de codis PRN	33
Figura 3.9: Correlació entre el codi rebut i el codi generat internament per el receptor [31]	35
Figura 3.10: Bandes freqüencials Galileo [23]	38
Figura 3.11: Disponibilitat sistema Galileo en funció dels satèl·lits operatius [23]	38
Figura 3.12: Funció d'autocorrelació del senyal GPS (color blau) i de Galileo (color vermell)	39
Figura 3.13: Horizontal Position Error (95%) en el cas de Galileo OS E1/E5a [22]	40
Figura 3.14: Expectatives d'exactituds de posició horitzontal i vertical (95%) en metres fent servir <i>SF</i> o <i>DF</i> en funció del número de satèl·lits operatius [23]	40
Figura 4.1: Fonts d'error del senyal GPS [27]	41
Figura 4.2: Error orbital del satèl·lit [39]	44
Figura 4.3: Densitat de ionització típica de la ionosfera [33]	46
Figura 4.4: Taula de valors de B i δR en funció de l'alçada [36]	50

Figura 4.5: Gràfica del retard troposfèric en funció de l'angle zenital del satèl·lit	51
Figura 4.6: Escenari amb multipath.....	52
Figura 4.7: Efecte del multipath en la funció de correlació [23]	53
Figura 4.8: Escenari amb una reflexió	54
Figura 4.9: Carrer Valencia de Barcelona	54
Figura 4.10: Distàncies escenari 1	55
Figura 4.11: Distàncies escenari 1	55
Figura 4.12: Carrer de Villarroel Barcelona	56
Figura 4.13: Escenari amb tres reflexions	57
Figura 4.14: Càlcul primera reflexió.....	57
Figura 4.15: Càlcul primera reflexió.....	58
Figura 4.16: Càlcul segona reflexió	59
Figura 4.17: Càlcul segona reflexió	59
Figura 4.18: Càlcul tercera reflexió.....	60
Figura 4.19: Càlcul tercera reflexió.....	61
Figura 4.20: Escenari utilitzat amb REMCOM.....	62
Figura 4.21: Senyals reflectides en el nostre escenari	63
Figura 4.22: Valors de Delay Spread a cada punt.....	64
Figura 4.23: Resultats en el punt 1.....	64
Figura 4.24: Esquerra: patch 4x4 utilitzat. Dreta: diagrama de radiació de l'antena.....	65
Figura 4.25: Delay Spread fent servir antena millorada	66
Figura 4.26: Gràfic comparatiu del <i>Delay Spread</i> fent servir les dues antenes	66
Figura 4.27: Horizontal Position Error (95%) del GPS de l'1 d'octubre al 31 de desembre de l'any 2016 [18]	70
Figura 5.1: Diagrama del funcionament del DGPS.....	72
Figura 5.2: Diagrama del funcionament del RTK.....	73
Figura 5.3: SBAS i les regions en les que es troben [38]	74
Figura 5.4: Funcionament SBAS	75
Figura 5.5: A l'esquerra es pot veure les diferents estacions que s'encarreguen de fer mesures dels senyals. A la dreta, la projecció en el pla horitzontal (R95) de la posició obtinguda per un receptor GPS (verd) i un receptor GPS+EGNOS(blau) [16]	76
Figura 5.6: Funcions del projecte InLANE	77
Figura 5.7: Detecció de senyals de tràfic	79
Figura 5.8: Detecció de línies de carril i mesures de la posició relativa del cotxe respecte l'entorn.....	79
Figura 8.1: Constel·lació nominal del GPS.....	82
Figura 8.2: Estacions de control GPS	84
Figura 8.3: Transmissions entre segments GPS	84
Figura 8.4: Funció de distribució de probabilitat del tipus Gaussiana.....	86
Figura 8.5: Comparació entre exactitud i precisió	87
Figura 8.6: Estructura de les estacions EGNOS	89
Figura 9.1: GMS i GCS de Galileo	91
Figura 10.1: Diagrama de blocs Anti-Lock Braking System	92
Figura 10.2: Valors per defecte	92
Figura 10.3: Valors per simulació a 30 Km/h.....	93
Figura 11.1: Configuració del senyal a transmetre (L1 GPS)	94
Figura 11.2: Configuració del transmissor i del receptor	94

Figura 11.3: Posició del satèl·lit`	95
Figura 11.4: Punts on es mourà el cotxe i mesurarem els retards	95
Figura 11.5: Obtenció del Delay Spread en tots els punts definits	95
Figura 11.6: Procediment per carregar una antena en format .uan.....	96
Figura 11.7: Característiques del transmissor i receptor	96

1. INTRODUCCIÓ

1.1. El cotxe autònom

El cotxe autònom és un automòbil que té la capacitat d'obtenir informació del seu entorn per després interactuar tal i com ho faria un humà que estigués conduint, evitant possibles accidents i arribant al destí que es desitja.

La història del cotxe autònom es remunta en l'any 1980 quan Ernst Dickmanns i el seu equip de la universitat de Múnic van dissenyar un cotxe que funcionava amb càlculs probabilístics i computació paral·lela i d'aquesta manera permetia resoldre diferents problemes simultanis. Va ser quan la Comissió Europea es va mostrar interessada en aquest projecte i van fer una gran inversió del que equivaldria a 800 milions d'euros per al projecte anomenat EUREKA Prometheus que pretenia desenvolupar el cotxe autònom.

L'any 1995, l'equip de Dickmanns va modificar un Mercedes-Benz Classe S perquè fes un viatge entre Múnic i Copenhaga i tornés, mitjançant una visió computeritzada. Van aconseguir que hi hagués intervencions humanes cada 9 Km, lo que suposa un 95% de conducció autònoma. Es va concloure que es pot realitzar de manera autònoma i segura canvis de carril i avançaments.

Tot i que han hagut molts avanços en el camp dels cotxes autònoms, encara falta molt camí per recórrer. Una de les coses que fan falta és una reforma legal que permeti als cotxes autònoms circular per les carreteres. Waymo, empresa propietat de Google, va aconseguir que el govern de la ciutat de Chandler (Arizona) li permetés la utilització dels seus carrers com a circuit privat per a la circulació dels cotxes autònoms.

El passat 4 d'octubre de 2017 es va aprovar la primera llei a favor dels cotxes autònoms a Estats Units la qual eliminaria els impediments a la implementació de la conducció autònoma. *Ford, General Motors, Alphabet (matriu de Google i Waymo), Volkswagen i Tesla* es van encarregar de pressionar als senadors en Washington per que obrís la legislació a favor del cotxe autònom ja que moltes d'elles han anunciat la pretensió de comercialitzar-los a partir del 2020.

Fins aquella data, la legislació vigent d'Estats Units obligava a que sempre hi hagués una persona al volant mentre el cotxe estigués en moviment. Però els fabricants d'automòbils que s'han esmentat van negociar amb la National Highway Traffic Safety Administration (Direcció General de Tràfic d'Estats Units) i amb els governants dels diferents estats on van realitzar les proves com Califòrnia, Nevada o Michigan per poder realitzar proves. Amb l'aprovació d'aquesta llei el que s'ha volgut aconseguir és adoptar uns criteris unitaris per a tot el territori estatunidenc per tal de que no frenin el desenvolupament de la implementació progressiva dels cotxes amb funcions automàtiques i finalment amb la implementació total de cotxes autònoms.

Els experts han definit sis nivells en la evolució de la conducció autònoma. Cada nivell descriu la independència del cotxe amb el conductor enfront a les tasques i responsabilitats en la conducció:

- **Nivell 0:** els cotxes no condueixen automàticament, únicament tenen alguns sistemes d'alerta.
- **Nivell 1** (assistència en la conducció): en aquest nivell el cotxe incorpora el control de creuer que consisteix en mantenir-se en el seu propi carril. A més, manté la distància de seguretat amb el cotxe de davant.
- **Nivell 2** (semi autònom): el conductor és capaç de estar sense utilitzar ni els pedals ni el volant durant una duració determinada ja que s'encarrega el cotxe.
- **Nivell 3** (autònom controlat): el cotxe és capaç de circular sol en determinades situacions com en autopistes i autovies. Aquest sistema l'ha d'activar el propi conductor i ha d'estar alerta en cas de voler actuar quan cregui necessari.
- **Nivell 4** (autònom condicionat): no es requerirà la interacció del conductor ja que el cotxe serà capaç de circular sol en cas de que els sensors incorporats en el cotxe tinguin tota la informació necessària per fer-ho amb seguretat.
- **Nivell 5** (autònom total): el cotxe circularà de manera autònoma sota qualsevol circumstància.

Durant la conferència mundial que es celebra tots els anys a Barcelona, la *Mobile World Congress 2018* es va entrevistar a Dirk Wisselmann, expert de BMW en la conducció autònoma i va dir: “*Esperem tenir un cotxe autònom de nivell 3 a partir de 2021*”. Va assegurar que a partir d'aquell any, en les carreteres podrien circular cotxes autònoms de nivell 3 d'autonomia, que com ja s'ha mencionat anteriorment, significarà que el cotxe és capaç de conduir per si mateix en carreteres com autopistes i autovies. Llavors, podràs deixar al cotxe que condueixi mentre parles per el mòbil o veus una pel·lícula i si fos necessari el cotxe et demanarà (amb suficient antelació) que agafis el control del cotxe.

Falten molts anys per poder veure un cotxe autònom de nivell 5 circulant per les carreteres. De moment, podem afirmar que s'està investigant i treballant molt per tal d'arribar a tenir-ho. Fins aleshores s'haurà de treballar per poder homologar la circulació dels cotxes autònoms de nivell 3 que és, el futur immediat.

Un cop s'ha vist què és un cotxe autònom, ara es veurà la seva estructura interna, és a dir, quins mecanismes té i com funcionen per tal de realitzar tasques autònomes.

Per tal de realitzar una conducció autònoma, és necessària la utilització d'un sistema complex que consisteix en molts subsistemes diferents (com podem observar en la **Figura 1.1**). Aquests subsistemes es poden dividir en tres components principals: algorismes, sistemes de client i la plataforma al núvol (cloud). El d'algorismes es divideixen en tres subsistemes principals que són la percepció, detecció i la decisió, la qual requereix raonament en casos complexes; sistemes de client inclou el sistema operatiu i la plataforma de hardware i per últim tenim el subsistema de la plataforma al núvol que inclou els mapes d'alta definició, model de deep learning, simulació i el emmagatzematge de dades.

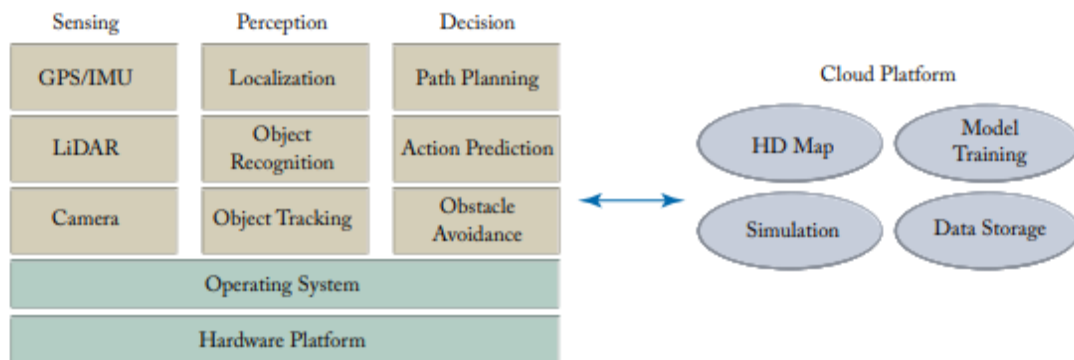


Figura 1.1: Sistema del cotxe autònom [5]

El subsistema d' algorismes extreu informació significativa dels sensors en forma de dades que més endavant serviran per entendre l'entorn i la presa de decisions. Després es troba el sistema client el qual integra aquests algorismes junts per tal d'oferir requeriments fiables en temps real. Per últim, la plataforma al núvol ofereix l'emmagatzematge per al cotxe autònom. Gràcies a aquest subsistema es podran provar nous algorismes, actualitzar els mapes *High Definition (HD)* i integrar millores en models de decisió.

De tots aquests subsistemes, es parlarà del d'algorismes ja que s'estudiaran els sensors que conformen el cotxe autònom per tal d'extreure informació necessària de l'entorn per a la seva localització.

2. El cotxe autònom i el seu entorn

2.1. Sensors de posicionament del cotxe autònom

Un cotxe autònom té diferents tipus de sensors que, combinats entre ells, extrauen informació imprescindible de l'entorn per tal de fer segura la conducció autònoma. Els sensors són bàsicament: càmeres òptiques, LiDAR, GPS/IMU, RADAR i sensors d'ultrasons.

Es vol que el cotxe autònom circuli de manera segura. Per tal de garantir-ho hi hauran multitud de paràmetres que s'hauran d'assegurar i en particular els de distància. En aquest treball es centra en dos: que mantingui una distància de seguretat amb el cotxe de davant i mantingui una separació lateral. Per tal d'assegurar aquests paràmetres és necessari conèixer la posició relativa del cotxe respecte un altre i per fer-ho s'utilitzen bàsicament sensors locals com el RADAR, LiDAR, càmeres i sensors d'ultrasons però en canvi si el que es vol és saber la posició absoluta de quin carril es troba el cotxe s'utilitzarà principalment sensors de posicionament per satèl·lit.

Un cop s'han vist les funcions que desenvoluparan els sensors de posició involucrats en la conducció autònoma en els escenaris plantejats, s'estudiarà com funcionen cadascun d'ells.

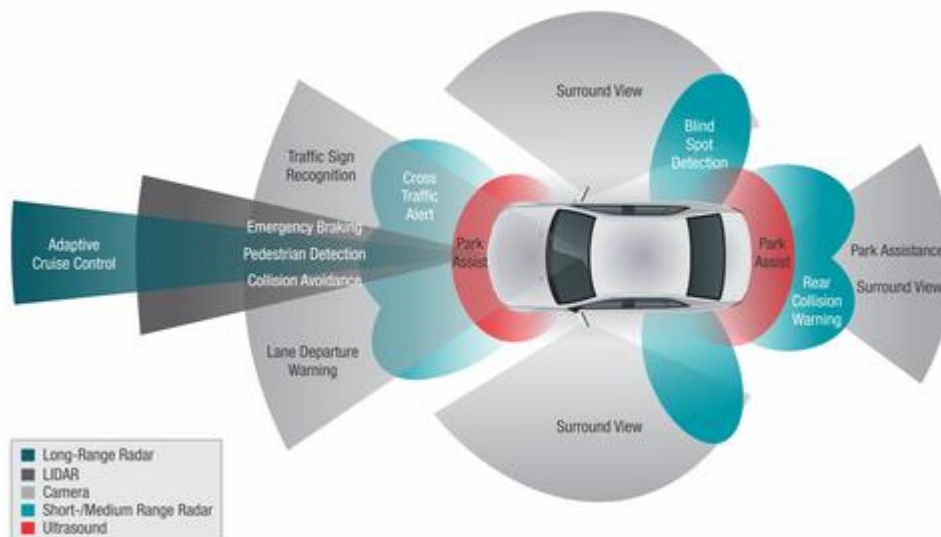


Figura 2.1: Sensors del cotxe autònom [28]

2.1.1. Global Positioning System(GPS)+Inertial Measurement Unit (IMU)

El sistema GPS/IMU s'encarrega d'ajudar al cotxe autònom a localitzar-se mitjançant estimacions inercials (extrapolació de la posició a partir dels paràmetres del moviment) i actualitzacions de la seva posició global (coordenades geogràfiques i l'altitud del receptor) .

El GPS, del que més endavant s'estudiarà amb més detall, és un sistema de posicionament basat en una xarxa de 24 satèl·lits que és capaç de determinar la posició amb una alta exactitud del cotxe en qualsevol punt de la Terra.

Un receptor GPS necessita un mínim de quatre satèl·lits per determinar la seva posició absoluta (x,y,z) amb una exactitud d'uns dos metres però és possible arribar a exactituds de centímetres mitjançant tècniques diferencials.

Aquest sistema presenta un problema, ja que sempre serà necessari la visibilitat de al menys, quatre satèl·lits però hi hauran moments durant la conducció autònoma on es perdi temporalment el senyal per presència d'obstacles com poden ser edificis molt alts o al entrar a un túnel. Si aquesta pèrdua del senyal és durant molts segons pot ser perillós ja que es perdrà la possibilitat de localitzar el cotxe. Per tal de solucionar aquest problema, s'integren les mesures del GPS amb la dels sistemes de navegació inercial, anomenats INS (Inertial Navegation System), mitjançant un sensor anomenat IMU (Inertial Measurement Unit).

Els INS permeten determinar la posició del cotxe a partir dels valors de la acceleració lineal i la velocitat angular mesurada per el sistema. Integrant aquesta informació i la obtinguda per sensors anomenats odòmetres (instrument de mesura capaç de calcular la distància que recorre el cotxe) es podrà calcular la posició actual a partir de la posició inicial. Com s'ha esmentat anteriorment és de gran utilitat en el cas de que el cotxe perdi el senyal GPS, per exemple, en la entrada d'un túnel ja que aquest sistema sabent la posició que tenia abans de perdre el senyal i mitjançant l' acceleració i velocitat angular és capaç de fer un càlcul de la posició actual del cotxe.

És possible utilitzar els dos sistemes, el GPS i el IMU, per tal de millorar el guiatge dels cotxes en cas de pèrdua del senyal. L'inconvenient principal d'aquest sistema és que els càlculs que realitza es degraden amb el temps, és a dir, només és un sistema fiable a curt termini.

2.1.2. LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging or Laser Imaging Detection and Ranging) és una tecnologia que consisteix en mesurar la distància a un objectiu il·luminant-lo amb una llum làser polsada i amb un sensor mesurar aquests polsos reflectits i el seu temps d'arribada i d'aquesta manera construir-se un "mapa" en 3D de l'entorn més proper al cotxe.

El funcionament és el següent: un instrument LiDAR dispara polsos de llum làser en una superfície a 150,000 polsos/s. Llavors, un sensor mesura el temps que triga cada puls en recórrer el trajecte. La llum emesa viatja a una velocitat coneguda per el LiDAR i d'aquesta manera pot calcular la distància entre ell i l'objecte amb una alta exactitud. El LiDAR pot construir un mapa complex de la superfície que està mesurant gràcies a la repetició d'aquest procediment. La finalitat d'aquest mètode és el de construir mapes d'alta definició, localitzar un cotxe que estigui en moviment i detectar obstacles.

Tot aquest procés, fa que el LiDAR generi un núvol de punts proporcionant-li d'aquesta manera una descripció de la forma de l'entorn. És per això que els sistemes LiDAR utilitzen filtres de partícules, d'aquesta manera el sistema compara un element específic amb el mapa conegut per tal d'eliminar la incertesa. Mitjançant la utilització d'aquest filtre el sistema és capaç de localitzar en temps real d'uns 10 cm de precisió i en un rang de 200 metres. No obstant això, aquest sistema té problemes quan hi ha pluja, pols, és a dir, quan hi ha partícules suspeses a l'aire ja que aquestes dificulten la tasca de localització.

2.1.3. Càmeres òptiques

Diverses càmeres generen imatges del voltant del cotxe com si fossin els ulls d'un humà. A diferència dels altres sensors, són capaços de detectar els colors i interpretar senyals de tràfic, llums dels semàfors i fins hi tot les marques vials en la calçada i les línies dels carrils.

Hi ha un total de vuit o més càmeres al voltant del cotxe (**Figura 2.1**) de manera que puguin realitzar les funcions esmentades anteriorment amb precisió. Cadascuna d'aquestes càmeres són capaces de gravar imatges a una resolució de 1080p i solen funcionar a 60 Hz generant, combinades entre elles, un volum de dades de 1,8 Gb de dades/segon.

En relació a les càmeres frontals, que en solen ser tres, la de major rang té un angle de visió estret amb un rang de 250 metres, la de rang mitjà té un angle més obert i arriba fins als 120 metres i per últim tenim una càmera que és de gran angular amb un rang de fins 60 metres.

Les dues càmeres laterals davanteres serveixen per veure per els laterals i per veure on les davanteres no aconsegueixen veure per l'angle de visió i tenen un rang de 80 metres. Per últim trobem tres càmeres posteriors.

El principal desavantatge d'aquest sensor és quan hi han condicions que redueixen la visibilitat com pot ser pluja molt intensa, boira i fins hi tot quan és de nit ja que només podria veure a poca distància a causa de la poca llum.

2.1.4. RADAR

Radio Detection And Ranging (RADAR) envien ones electromagnètiques a freqüències de radio que si xoquen amb un obstacle són reflectides i el sensor és capaç de manera similar al LiDAR de saber la distància a la qual es troba el cotxe i fins i tot obtenir informació important com la velocitat a la que circula. Els cotxes autònoms utilitzen dos tipus de radars: els de curt i llarg abast. Els radars de llarg abast són capaços de detectar objectes fins a 200 metres.

Presenta un inconvenient, que els radars només capten informació en 2D ja que emeten amb un diagrama sectorial més ample en horitzontal i més estret en la vertical, fet que només siguin capaç de determinar la distància a la que es troben els objectes i no pas les alçades. Per solucionar aquest problema s'estan desenvolupant radars en 3D.

Actualment, el cotxe autònom de Google disposa de quatre sensors RADAR. Tres estan ubicats en el para-xocs davanter: un a la part frontal i dos, un a cada costat, en les cantonades. En el para-xocs darrer va col·locat el l'últim RADAR. Com ja em dit, s'encarreguen de detectar objectes i mesurar distàncies al voltant del cotxe. El davanter s'encarrega de mesurar la distància amb el cotxe que el precedeix i pot tenir un abast màxim de 200 metres, els dels costats s'encarreguen de supervisar els carrils laterals o els cotxes estacionats i per últim el darrer es sol utilitzar al aparcar.

2.1.5. Ultrasons

Els sensors d'ultrasons emeten ones de so i quan aquestes xoquen amb un objecte aquests produeixen ecos i d'aquesta manera quan tornen són capaços de revelar la localització precisa de l'obstacle.

Aquests sensors tenen el rol en el cotxe autònom de detectar obstacles a curta distància, ja siguin cotxes o vianants. La seva funció principal és l'aparcament automàtic ja que d'aquesta manera detecta on està el cotxe de davant i de darrera i realitzar l'aparcament amb seguretat.

Un cop estudiats els diferents sensors, s'ha realitzat una taula (**Taula 1.1**) on es comparen les seves principals característiques:

Tabla 2.1: Taula comparativa dels diferents sensors del cotxe autònom

	LiDAR	RADAR	Càmera òptica	Ultrasons
Densitat de dades	Baix	Mitjà	Alt	Baix
Detecció senyals	No	No	Alt	No
Detecció carril	No	No	Alt	No
Velocitat de mesura	Baix	Alt	Baix	Alt
Funcionament amb boira, pluja o neu	Baix	Alt	Baix	Alt
Funcionament en la foscor	Alt	Alt	Baix	Alt
Cost	Alt	Baix	Mitjà	Baix
Rang	200 metres	200 metres	250 metres	3 metres

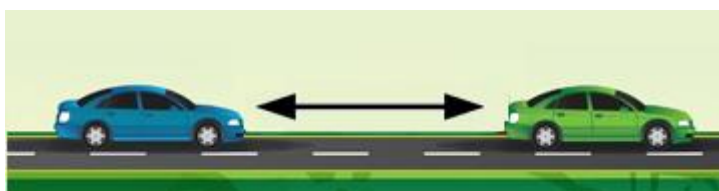
2.2. Distàncies per a una conducció autònoma segura

Aquest estudi es centrarà, com s'ha esmentat anteriorment, en la distància de seguretat frontal i lateral mínimes.

Primerament s'estudiarà la distància de seguretat frontal mínima que han de mantenir els cotxes autònoms entre ells per tal de garantir la seva seguretat i després la separació lateral que ha d'haver entre els cotxes.

2.2.1. Distància frontal de seguretat mínima

Per tal d'estudiar aquest apartat, s'ha de tenir en compte diferents variables que afecten a la distància de seguretat. Aquestes variables són: el temps de reacció (del ser humà i del cotxe autònom), la distància de reacció (que depèn de l'anterior) i la distància de frenat.

**Figura 2.2: Distància de seguretat**

El temps de reacció és un punt clau per tenir en compte quan es parla d'una conducció segura. Com més es trigui en reaccionar enfront un perill, més probabilitat hi haurà de patir un accident.

Això passa ja que el conductor o l'autòmat, des de que veu el perill fins que acciona el pedal del fre, el cotxe recorre una certa distància i a major velocitat major serà el recorregut que faci. Aquesta distància que recorre el cotxe des de que es percep el perill fins que s'acciona el fre, s'anomena distància de reacció.

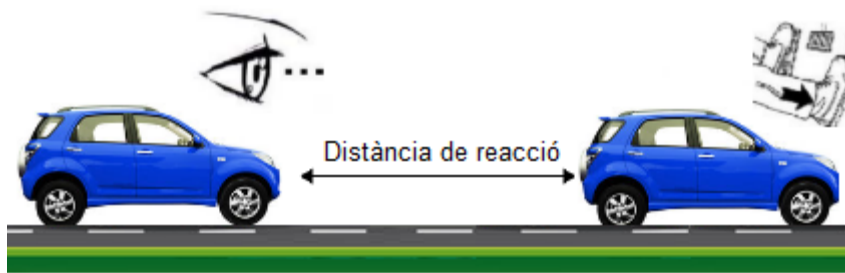


Figura 2.3: Distància de reacció

Si se circula amb un cotxe a 50 km/h en una travessia i el conductor o autòmat veu que el cotxe de davant fa un frenat d'emergència, si es triga un segon en reaccionar i pressionar el pedal del fre, el cotxe haurà recorregut una distància de 13,8 metres i aquesta distància és directament proporcional a la velocitat i al temps que es trigui en reaccionar.

En la següent gràfica (**Figura 2.5**) es pot observar la distància que recorre el cotxe des de que es percep un perill fins que s'acciona el pedal del fre:

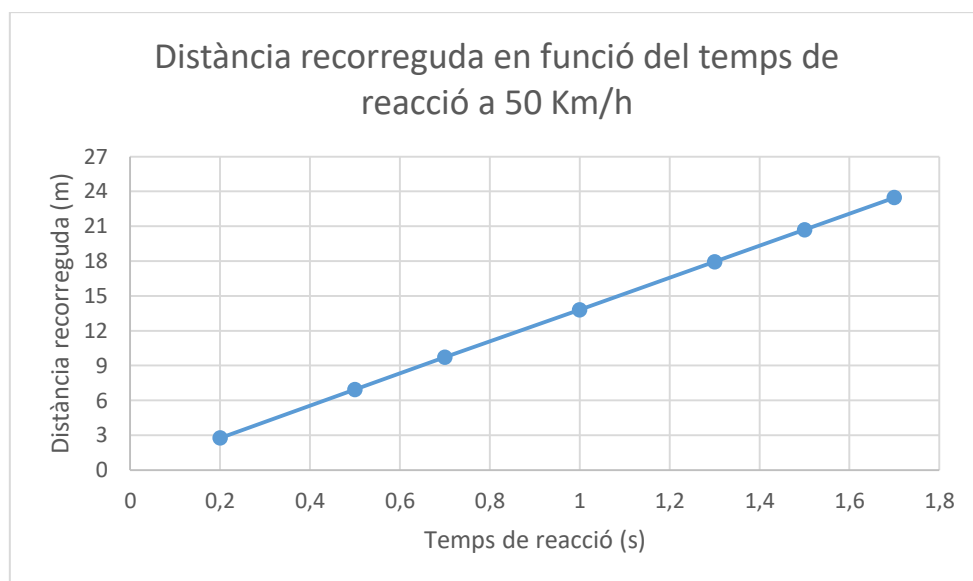


Figura 2.4: Gràfica de la distància recorreguda en funció del temps de reacció

La gran majoria dels estudis que s'han realitzat [1] indiquen que un conductor triga, de mitjana, un segon en reaccionar accionant el pedal del fre, en canvi un cotxe autònom pot trigar al voltant de 200ms.

Observant la **Figura 2.5** es pot veure com la distància de reacció que recorre el cotxe autònom és de tant sols 3 metres. Es pot veure en aquest cas que el temps de reacció en un cotxe autònom és una cinquena part del d'un humà i equival a menys distància recorreguda per el cotxe. A més, a major velocitat, major haurà de ser la distància de seguretat que s'hagi de mantenir amb el cotxe de davant per tal d'evitar una possible col·lisió en cas de frenat d'emergència.

Un cop vist el temps i la distància de reacció, podem definir el que s'anomena distància de frenada. Segons la *Dirección General de Tráfico (DGT)* la distància de frenada és la distància que recorre el cotxe des de que es trepitja el fre fins que el cotxe es detén completament. Evidentment, un cotxe no pot frenar en sec i menys quan va a una velocitat elevada, per això sempre ha d'haver una certa distància de separació entre vehicles. A més, cal tenir en compte que la distància de frenada no depèn de la distància de reacció però sí d'altres factors tals com: sistema de frens, estat del paviment, etc..



Figura 2.5: Distància de frenada

Per tal d'obtenir la distància de frenada que recorre un cotxe s'ha utilitzat un model de Matlab adaptat al nostre cas, que permet simular de manera bastant realista la distància de frenada que recorre un cotxe en cas de frenat d'emergència [10]. El model que utilitzat és l'anomenat: *sldemo_absbrake* (Annex 2).

La variable V_o és la velocitat angular de la roda i s'ha de posar en radians/s. Per fer-ho utilitzem la següent expressió:

$$V_o = \frac{V}{R_r} \quad (2.2)$$

On R_r és el radi de la roda i V és la velocitat lineal en metres/s.

Per exemple, si volem realitzar la simulació per a una velocitat de 30 Km/h haurem de convertir-la en radians/s i ens quedarà:

$$V_o = \frac{V}{Rr} = \frac{8,33}{1,25} = 6,664 \text{ rad/s}$$

El resultat de realitzar la simulació amb aquests paràmetres donarà com a resultat la distància de frenada que recorre un cotxe a la velocitat que s'hagi indicat i aquesta distància serà la mateixa tant per als cotxes autònoms com per als no autònoms ja que s'assumeix que els seus frens actuen per igual i es troben en el mateix escenari.

Per als següents estudis, s'ha escollit que el temps de reacció d'un conductor, com ja s'ha dit anteriorment, és de 1 segon i el d'un cotxe autònom és aproximadament de 0,20 segons.

S'analitzaran els dos escenaris per tal de calcular la distància de seguretat mínima. El primer escenari serà quan el cotxe que tenim davant realitza una frenada d'emergència i serà la detenció considerant la distància de frenada del cotxe de davant. En canvi, el segon escenari que s'estudiarà serà calcular la distància de seguretat per tal d'evitar xocar amb el cotxe de davant en cas de que aquest tingui un accident de tràfic, és a dir, faci una detenció en sec.

2.2.1.1. Distància frontal de seguretat mínima en cas de frenada d'emergència

La distància que recorre un cotxe des de que percep un perill fins que queda totalment aturat serà la suma de la distància de reacció més la distància de frenat i s'anomena distància de detenció.



Figura 2.6: Escenari en cas de frenada d'emergència

La distància de reacció es pot obtenir amb un senzill càlcul coneixent la velocitat i el temps de reacció, però en canvi la distància de frenada no es pot calcular mitjançant fórmules matemàtiques. Gràcies al model Matlab *sldemo_absbrake* que s'ha comentat anteriorment es podrà obtenir el valor de la distància de frenada que recorre un cotxe a una certa velocitat.

Un cop s'hagin obtingut les distàncies de frenada es calcularà la distància frontal de seguretat mínima que han de mantenir els cotxes en cas de que el cotxe de davant realitzi una frenada d'emergència.

La DGT ha fet pública una taula on apareixen les distàncies de seguretat que recomanen tenir amb el cotxe que ens precedeix per tal d'evitar un possible accident. D'aquesta manera es tindrà una referència de la distància de

seguretat recomanada i es compararà amb la distància de seguretat mínima calculada.

Tabla 2.2: Distància de seguretat recomanada per un cotxe no autònom segons la DGT

Velocitat (Km/h)	Distància de seguretat (m)
30	16,6
45	25
60	33,3
75	41,6
90	50
120	66,6

Per tal de calcular la distància de seguretat mínima, s'ha extret del treball de fi de grau de Kevin Díez de la EETAC [2], una expressió on es pot calcular mitjançant els resultats de les simulacions.

L'escenari és el següent: hi ha dos cotxes, un darrere l'altre. La fórmula consisteix en trobar la D_0 (distància de seguretat) i s'igual a 0 ja que s'està buscant quan la distància entre vehicles sigui igual a 0 metres, és a dir, la distància mínima abans de xocar.

$$D(t, V_{steady}) = D_0 + D_{stopping} - V_{steady} * T_{reaction} = 0 \quad (2.1)$$

- D = Distància total entre els cotxes (m)
- t = temps total desde que frena el cotxe davanter fins que es paren els dos (s)
- V_{steady} = velocitat constant del cotxe (m/s)
- D_0 = distància de seguretat (m)
- $T_{reaction}$ = temps de reacció del cotxe (s)
- $D_{stopping}$ = distància de frenada que recorre el cotxe de davant durant el temps de reacció del cotxe de darrera (m)

És obvi que quan més distància de seguretat hi hagi millor, però s'assumirà que es vol que els cotxes autònoms circulin tots el més junts possible per tal

d'optimitzar l'espai en les carreteres així com el flux i per això es calcula la distància de seguretat mínima.

S'ha realitzat una simulació per veure la distància de frenada que recorre un cotxe al realitzar un frenat d'emergència circulant a 45 Km/h amb el paviment sec i el resultat és la gràfica següent:

La gràfica de la **Figura 2.7** ens proporciona la distància de frenada que realitza un cotxe circulant a 45 km/h. L'eix Y ens indica la distància que recorre en metres mentre que l'eix X ens indica el temps en segons.

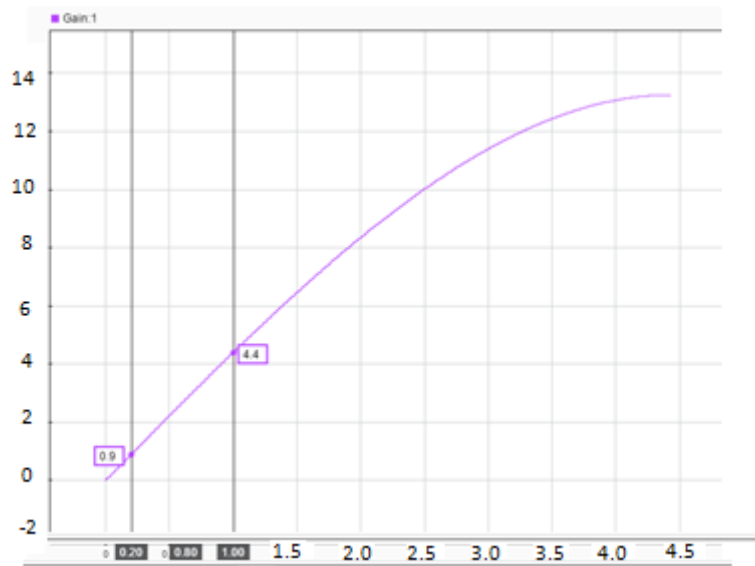


Figura 2.7: Gràfica de la distància de frenada d'un cotxe circulant a 45 km/h. L'eix Y representa la distància de frenada en metres mentre que l'eix X indica el temps en segons

El primer valor que es pot extreure és la distància de frenada que recorre el cotxe de darrera circulant a 45 km/h és de 13,2 metres. Els valors que es volen utilitzar a l'expressió (2.1) són els que estan marcats amb els cursors: la distància de frenada en 0,20 segons i en 1 segon. Aquests valors són la $D_{stopping}$. Aquesta variable indica la distància de frenada que recorre el cotxe de davant durant el temps de reacció del de darrera.

La següent taula representa els valors obtinguts amb les diferents simulacions en funció de les velocitats i si és un cotxe no autònom o autònom:

Tabla 2.3: Distància de frenada del cotxe de davant durant el temps de reacció d'un cotxe no autònom (1s) i d'un cotxe autònom (200 ms) que circula darrere

Velocitat (Km/h)	Distància de frenada durant temps reacció d'un cotxe no autònom (m)	Distància de frenada durant temps de reacció d'un cotxe autònom (m)
30	3,4	0,65
45	4,4	0,9
60	5,3	1,1
75	6,3	1,2
90	7,2	1,4
105	8,2	1,6
120	9,1	1,8

Un cop obtinguts aquests valors, si s'aplica l'expressió(2.1), aïllant D_0 , s'obtindrà la distància de seguretat mínima per tal de no xocar amb el cotxe de davant tant per als cotxes no autònoms com per els autònoms i els resultats es poden observar en la següent taula:

Tabla 2.4: Distància de seguretat mínima per evitar xocar amb el cotxe de davant

Velocitat (Km/h)	Distància de seguretat mínima d'un cotxe no autònom (m) amb $T_{reaction} = 1 \text{ s}$	Distància de seguretat mínima d'un cotxe autònom (m) amb $T_{reaction} = 200 \text{ ms}$
30	4,93	1,02
45	8,1	1,6
60	11,36	2,23
75	14,53	2,96
90	17,8	3,60
105	20,96	4,23
120	24,23	4,87

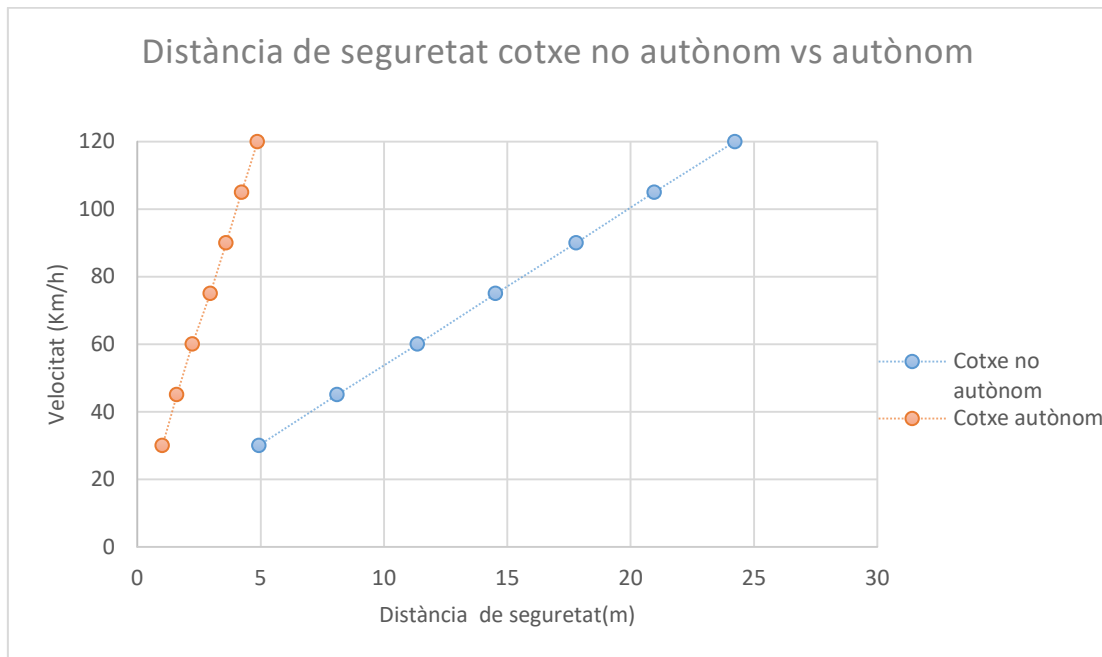


Figura 2.8: Gràfica de la distància de seguretat mínima per a cotxes autònoms i no autònoms en funció de la velocitat en cas de frenada d'emergència

Es pot observar en la **Figura 2.11** la gran diferència entre les distàncies de seguretat depenent si és un cotxe autònom o no. La distància de seguretat mínima per evitar xocar amb el cotxe de davant per un cotxe no autònom circulant a 30 km/h és aproximadament la mateixa que per un cotxe autònom circulant a 120 km/h. Això és degut a que el temps de reacció d'un cotxe autònom pot ser una cinquena part del temps de reacció d'un no autònom.

2.2.1.2. Distància de seguretat mínima en cas de col·lisió

La segona situació que s'estudiarà serà quan el cotxe de davant tingui una col·lisió amb un altre vehicle i el de darrere faci un frenat en sec. En aquesta situació s'haurà de prescindir de la distància de frenada del cotxe davanter ja que aquesta serà igual a 0.



Figura 2.9: Escenari en cas de que el cotxe de davant tingui un accident

En aquest escenari s'utilitzarà la mateixa expressió (2.1) però eliminant la variable $D_{stopping}$ ja que el cotxe de davant no recorre cap distància frenant.

$$D(t, V_{steady}) = D_0 - V_{steady} * T_{reaction} = 0$$

Un cop fets els càlculs, la següent taula mostra els resultats de la distància de seguretat mínima:

Tabla 2.5: Distància de seguretat mínima per evitar xocar amb el cotxe de davant

Velocitat (Km/h)	Distància de seguretat mínima d'un cotxe no autònom (m) amb $T_{reaction} = 1 \text{ s}$	Distància de seguretat mínima d'un cotxe autònom (m) amb $T_{reaction} = 200 \text{ ms}$
30	8,33	1,66
45	12,50	2,5
60	16,66	3,32
75	20,83	4,17
90	25	5
105	29,16	5,84
120	33,33	6,66

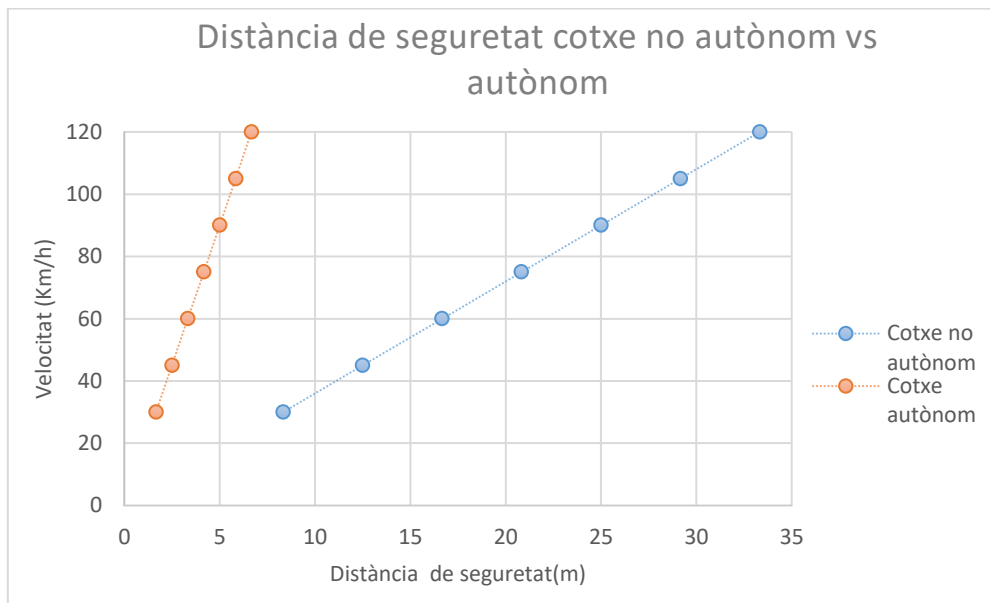


Figura 2.10: Gràfica comparativa de les distàncies de seguretat mínimes entre els cotxes no autònoms i autònoms en funció de la distància en cas de frenat en sec

Un cop estudiades les distàncies de seguretat mínimes per tal d'evitar xocar amb el cotxe de davant en cas de frenat d'emergència es pot observar la gran diferència respecte un cotxe autònom i un cotxe no autònom. En el cas d'un cotxe no autònom, a una velocitat de 120 Km/h, es necessita mantenir una distància de seguretat respecte el cotxe de davant de 24,23 metres. En canvi, si es circula amb un cotxe autònom a 120 Km/h, només caldrà deixar una distància de seguretat de 4,87 metres. Això vol dir que circulant amb un cotxe convencional s'haurà de deixar una distància de seguretat mínima cinc vegades superior que en el cas de circular amb un cotxe autònom.

Si s'analitza la distància de seguretat mínima per no xocar amb el cotxe de davant en cas de frenat en sec es passa d'una distància de seguretat mínima de 33,33 metres en el cas de conduir un cotxe convencional a 120 Km/h a una distància de 6,66 metres en el cas d'un cotxe autònom a la mateixa velocitat. S'estarà reduint aproximadament una cinquena part de la distància de seguretat en el cas d'un cotxe autònom i d'aquesta manera, reduint distàncies, s'optimitza l'espai en les carreteres i lo més important, es reduiria el nombre d'accidents.

2.2.2. Separació lateral

Un cop s'ha estudiat quines serien les distàncies de seguretat que han de mantenir els cotxes amb el cotxe de davant ara s'analitzarà un altre punt molt important: la separació lateral.

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquest TFG es centrarà en els requeriments de posicionament dels cotxes autònoms. En la imatge que s'observa a continuació, es pot veure de color taronja com en una carretera convencional d'Espanya l'amplada de cada carril són entre 2,50 i 3 metres. En el cas del sistema GPS estàndard, l'exactitud que s'obté és de 1,50 metres en el millor cas i en el pitjor cas uns 4 metres. Com és obvi, no és suficient per a la seguretat vial ja que no sabrem mai amb exactitud en el carril en el que ens trobem.



Figura 2.11: Amplada d'un carril i precisió GPS estàndard

Un cotxe convencional mesura aproximadament 1,80 metres d' amplada i sabent que cada carril mesura uns 2,50 m d' amplada queden 0,35 m d'espai a cada costat del carril. Si hi ha un altre cotxe al costat i s'assumeix que la seva amplada és la mateixa que el primer cotxe hi haurà una separació entre cotxe i cotxe d'uns 0,70 metres.

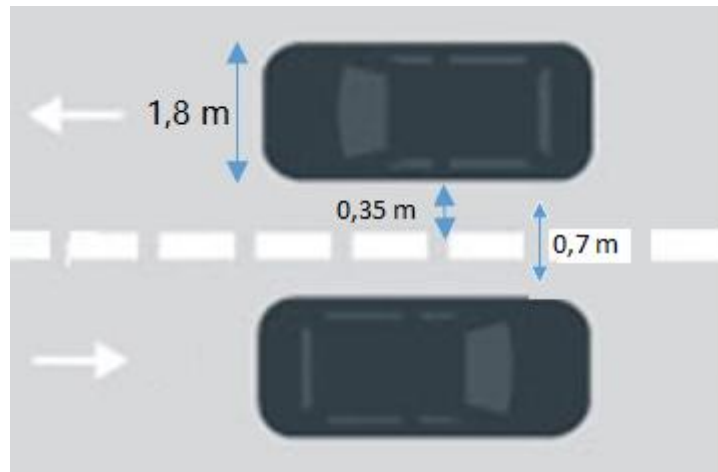


Figura 2.12: Separació lateral per cotxes autònoms

Per últim estudiar el pitjor cas, que seria quan hi ha un autobús o un camió autònom al costat d'un cotxe. Un camió té una mesura aproximadament de 2,5 metres d'amplada que equival a l' amplada del carril. Si s'està circulant amb un cotxe autònom amb amplada de 1,8 metres significa que queda un total de 0,35 metres entre el cotxe i el camió autònom, la meitat del cas anterior.

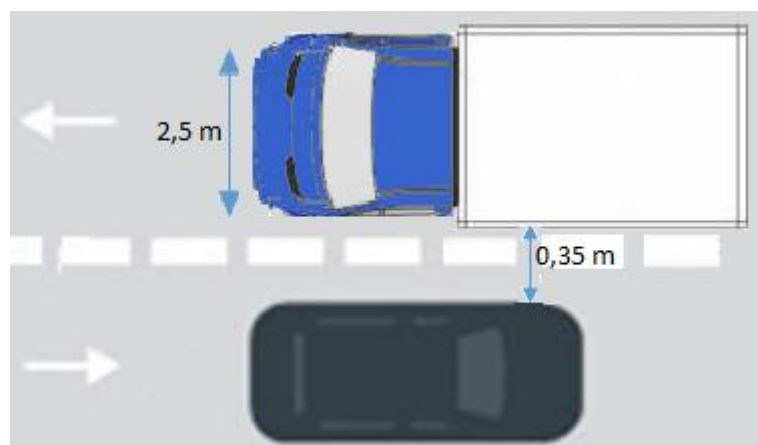


Figura 2.13: Separació lateral per a cotxes i camions autònoms

3. Sistemes de navegació per satèl·lit: Global Navigation Satellite System (GNSS)

3.1 Introducció

Des de l'inici de la història els éssers humans han tingut la necessitat de posicionar-se ells mateixos en l'entorn. Ho feien deixant pedres en els camins, marcant els arbres o fent referència a muntanyes, que van ser els primers punts de referència per al seu posicionament.

Més endavant, els éssers humans van sentir la necessitat de conquerir l'immens i majestuós oceà. En aquest entorn no era possible fer servir el sistema de referència que havien fet servir fins llavors. Al no poder fer servir les tècniques que feien servir a terra, van tenir que recórrer als únics objectes visibles des de l'oceà: el sol, la lluna i les estrelles i aquests van ser els seus punts de referència. Va ser llavors quan va començar la era de la navegació astronòmica.

Observant la posició relativa de les estrelles i la seva distribució geomètrica eren capaços d'estimar la seva posició en la Terra. Més endavant, amb la invenció d'instruments òptics van ser capaços de mesurar l'angle de visió entre les estrelles. I per últim, amb l'arribada dels senyals radio, va ser possible localitzar objectes mitjançant receptors.

El tercer capítol d'aquest projecte descriu de forma teòrica la tecnologia dels GNSS, fent un breu repàs de quin és el seu objectiu, quins elements els formen i com funcionen. Finalment s'estudiarà del sistema GNSS més utilitzat en tot el món, el GPS, i també del futur sistema GNSS europeu anomenat GALILEO.

3.2 Composició i funcionament del sistema

Els sistemes de navegació per satèl·lit tenen una estructura definida, que es divideix en tres segments diferents: el segment espacial, segment de control i el segment d'usuaris i a continuació es parlarà en detall de cadascun d'ells:

3.2.1 Segments

3.2.1.1 Segment Espacial

El segment espacial d'un GNSS el formen els anomenats satèl·lits de navegació. Aquests satèl·lits són els encarregats de garantir una cobertura global en tot moment. Per poder fer-ho estan col·locats en diferents plans orbitals de manera que es cobreixi tota la Terra de manera global en tot

moment (actualment el GPS garanteix un mínim de 5 satèl·lits visibles en qualsevol part del món)

3.2.1.2 *Segment de Control*

És el format per el conjunt d'estacions en terra que recullen les dades dels satèl·lits. Aquest segment és propi de cada país o coalició de països, i cadascun té les seves pròpies característiques.

La seva funció principal és la de garantir les prestacions del sistema mitjançant el monitorització del segment espacial i aplicant correccions de posicions orbitals i temporals als satèl·lits, enviant informació de sincronització de rellotges atòmics i correccions de posicionament orbitals a cada satèl·lit mitjançant un enllaç radio en banda S. Aquest segment està format per estacions de monitorització, una estació anomenada *Master Control Station (MCS)* i estacions de transmissions de dades.

La funció principal de la *MCS* és la d'ajustar els paràmetres orbitals dels satèl·lits i els rellotges quan sigui necessari.

Les estacions de monitorització, estan ubicades en punt estratègics de la Terra i serveixen per monitoritzar les senyals del satèl·lits i el seu estat, i transmetre aquesta informació a la estació de control màster. La *MCS* analitza aquesta senyal i transmet les correccions orbitals i temporals als satèl·lits mitjançant estacions uplink.

3.2.1.3 *Segment d'Usuari*

Està format per els equips GNSS que reben els senyals que provenen del segment espacial. Aquests equips estan formats per una antena receptora de GNSS a la freqüència de funcionament del sistema, de cobertura hemisfèrica omnidireccional i per un receptor del tipus heterodí basat en la barreja de freqüències que permet passar la freqüència que rep a la antena a una baixa per poder ser utilitzada per l'electrònica del receptor.

Un cop definida l'estructura bàsica d'un sistema global de navegació per satèl·lit, es veuran les prestacions bàsiques que ha d'oferir. Cada sistema té prestacions en particular però ja es parlarà d'elles més endavant.

- Disponibilitat: el sistema ha de garantir el seu normal funcionament al voltant del 95% o 99% del temps. Per tal de garantir-ho s'introdueixen satèl·lits redundants a la constel·lació per garantir el funcionament en cas de que algun altre falli.
- Cobertura: ha de garantir una cobertura mundial per tal de que des de qualsevol punt del planeta es pugui utilitzar el sistema correctament.
- Exactitud: el sistema ha de proporcionar un posicionament espacial i temporal d'una alta exactitud.

- **Integritat:** fa referència a com de fiables són les dades que s'estan utilitzant. Per poder quantificar-la, es sol expressar el risc de pèrdua d'integritat com la probabilitat de fallada no detectada. És a dir, els satèl·lits han de poder transmetre informació fiable i no errònia.
- **Continuïtat del servei:** aquesta prestació es parla únicament per el cas del GPS ja que el Govern Nord-americà podria apagar el senyal civil que generen els seus satèl·lits.

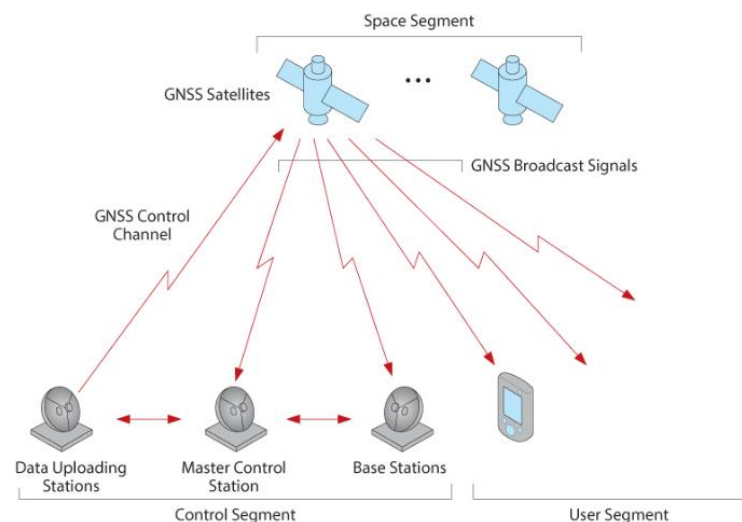


Figura 3.1: Segments GNSS [29]

3.2.2 Funcionament d'un sistema GNSS

En aquest apartat s'estudiaran els aspectes claus del funcionament d'un sistema GNSS. Ara que es coneix l'estructura bàsica i les prestacions que han d'oferir, es veurà el procés que es dona des de que s'envia la informació fins que es rep i com es fa el càlcul de la posició a partir d'aquesta informació.

Per tal de que el sistema GNSS funcioni correctament, s'hauran d'involucrar els diferents segments comentats anteriorment:

- **Segment espacial:** envia el senyal que reben el segment d'usuaris i el de control
- **Segment de control:** rep el senyal del segment espacial, monitoritza i actualitza la informació enviant correccions als satèl·lits si és necessari
- **Segment d'usuari:** rep la informació procedent del segment espacial i calcula la seva posició

3.2.2.1 Trilateració

Per tal de calcular la posició de l'usuari és necessari utilitzar la tècnica de trilateració¹.

Els satèl·lits segueixen la seva òrbita al llarg del temps, i per tant la distància entre ell i el receptor varia. Per això els satèl·lits envien de manera continua una senyal amb la informació de les seves efemèrides² i del rellotge al receptor. A partir d'aquesta senyal el receptor pot estimar el temps de propagació i si el multiplica per la velocitat de la llum obtenir la distància a la qual es troba el satèl·lit.

$$Distància_{sat-rec} = c * t_{sat-rec} \quad (3.1)$$

La distància que calcula el receptor s'anomena *pseudo distància*. El prefix pseudo s'afegeix perquè el valor no representa una distància verdadera, ja que els instants de transmissió i recepció del senyal fan referència a escales diferents: els rellotges del satèl·lit i del receptor no tenen perquè estar perfectament sincronitzats.

Un cop s'obtingui $distància_{sat-rec}$, aquesta distància serà el radi d'una esfera imaginària i la posició del receptor estarà sobre qualsevol punt dins la superfície d'aquesta esfera.

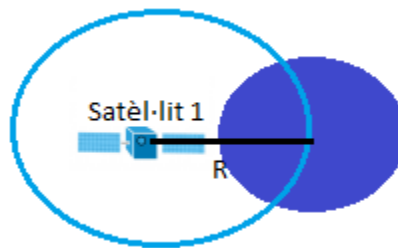


Figura 3.2: Esfera de radi R que forma un satèl·lit

Amb un segon satèl·lit hi hauran dues esferes i la intersecció d'aquestes dues és un cercle. Voldrà dir que el receptor està en qualsevol punt dins d'aquest cercle, però encara no podem saber la posició exacta.

¹ Trilateració: mètode matemàtic per determinar les posicions relatives d'objectes utilitzant

² Efemèrides: conjunt de paràmetres numèrics que descriuen les posicions dels satèl·lits en funció del temps.

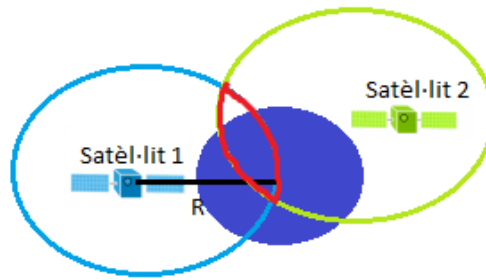


Figura 3.3: Intersecció entre dues esferes generades per dos satèl·lits

Un tercer satèl·lit genera una altra esfera que tallarà en dos punts sobre el cercle generat per els dos primers satèl·lits. El nostre receptor estarà en un d'aquests dos punts.

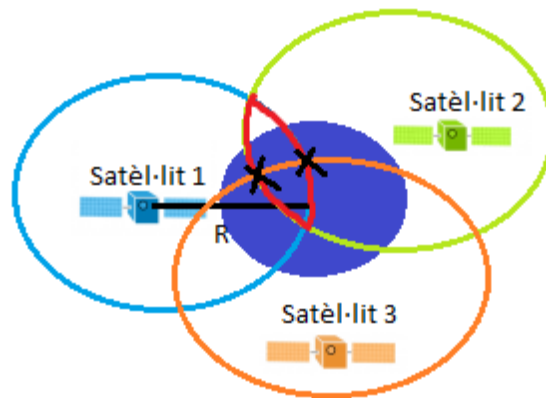


Figura 3.4: Intersecció entre tres esferes generades per tres satèl·lits

Gràcies a un quart satèl·lit es sabrà quin dels dos punts que s'han trobat anteriorment és, ja que la esfera que forma el satèl·lit 4 talla en un únic punt en comú de tots els altres satèl·lits. Aquest serà el punt on està el nostre receptor. A més, gràcies a aquest quart satèl·lit es resoldrà l'error de sincronisme dels rellotges.

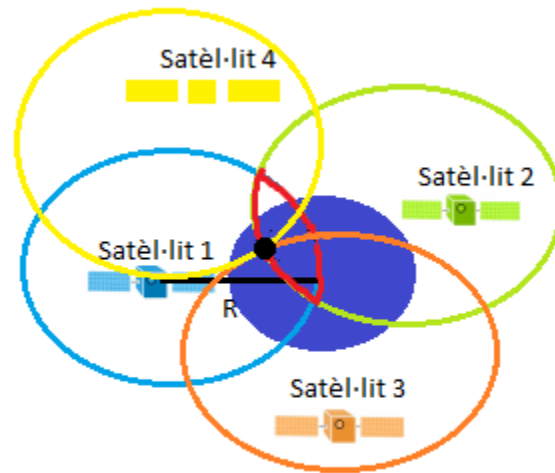


Figura 3.5: Intersecció entre quatre esferes generades per quatre satèl·lits

3.2.2.2 Càlcul de la posició

Per tal d'explicar com un GNSS calcula la posició, es suposarà que només existeix l'error de sincronització entre el rellotge del satèl·lit i del receptor (en el capítol 4 es veurà en detall les diferents fonts d'errors que existeixen).

Anteriorment s'ha estudiat que hi ha un cert error de sincronisme entre els rellotges i això fa que s'hagi de tenir en compte la incertesa del temps en el càlcul de la posició. El quart satèl·lit a més de saber quin dels dos punts mencionats anteriorment es troba el receptor, també serveix per eliminar aquest error de sincronisme entre els rellotges dels satèl·lits i del receptor.

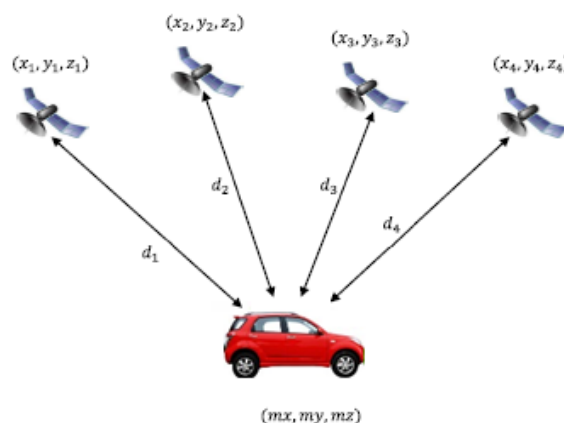


Figura 3.6: Càlcul de la posició d'un receptor GNSS

Gràcies als quatre satèl·lits, es pot plantejar un sistema de quatre equacions amb quatre incògnites que permetrà calcular la posició i corregir l'error de sincronisme entre els rellotges del satèl·lit i de l'usuari:

$$d_1^2 = (x_1 - mx)^2 + (y_1 - my)^2 + (z_1 - mz)^2 = (d_{1 \text{ mesurada}} - c * \text{error}_{\text{rellotge usuari}})^2$$

$$d_2^2 = (x_2 - mx)^2 + (y_2 - my)^2 + (z_2 - mz)^2 = (d_{2 \text{ mesurada}} - c * \text{error}_{\text{rellotge usuari}})^2$$

$$d_3^2 = (x_3 - mx)^2 + (y_3 - my)^2 + (z_3 - mz)^2 = (d_{3 \text{ mesurada}} - c * \text{error}_{\text{rellotge usuari}})^2$$

$$d_4^2 = (x_4 - mx)^2 + (y_4 - my)^2 + (z_4 - mz)^2 = (d_{4 \text{ mesurada}} - c * \text{error}_{\text{rellotge usuari}})^2$$

On:

- $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4) = \text{coordenades dels satèl·lits}$
- $d_{1 \text{ mesurada}}, d_{2 \text{ mesurada}}, d_{3 \text{ mesurada}}, d_{4 \text{ mesurada}} = \text{pseudorangs}$
- $\text{error}_{\text{rellotge usuari}} = \text{error de sincronisme}$
- $mx, my, mz = \text{coordenades del receptor}$

De totes les variables existents en les equacions anteriors, les coordenades dels satèl·lits $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$ són conegudes ja que el receptor rep les efemèrides en el missatge de navegació i el propi receptor calcula els pseudo rangs $d_{1 \text{ mesurada}}, d_{2 \text{ mesurada}}, d_{3 \text{ mesurada}}, d_{4 \text{ mesurada}}$ que el separen de cada satèl·lit. Per tant, s'obté quatre equacions amb quatre incògnites: les tres coordenades del receptor mx, my, mz i l'error del rellotge ($\text{error}_{\text{rellotge usuari}}$).

Per tant, s'haurà de solucionar el següent sistema d'equacions i d'aquesta manera obtenir les coordenades del receptor:

$$d_{1 \text{ mesurada}} - \text{error}_{\text{rellotge usuari}} = \sqrt{(x_1 - mx)^2 + (y_1 - my)^2 + (z_1 - mz)^2}$$

$$d_{2 \text{ mesurada}} - \text{error}_{\text{rellotge usuari}} = \sqrt{(x_2 - mx)^2 + (y_2 - my)^2 + (z_2 - mz)^2}$$

$$d_{3 \text{ mesurada}} - \text{error}_{\text{rellotge usuari}} = \sqrt{(x_3 - mx)^2 + (y_3 - my)^2 + (z_3 - mz)^2}$$

$$d_{4 \text{ mesurada}} - \text{error}_{\text{rellotge usuari}} = \sqrt{(x_4 - mx)^2 + (y_4 - my)^2 + (z_4 - mz)^2}$$

3.2.3 Fonts d'error

La informació procedent de cada satèl·lit que viatja en una senyal pot ser distorsionada per diferents factors fet que produeix una degradació en l'exactitud del servei. Degut a aquests errors s'han creat sistemes de millora per obtenir precisions molt millors.

Aquestes fonts d'error són les que anomenem a continuació i posteriorment s'analitzaran en detall com afecten les diferents fonts d'error a l'exactitud del servei:

- Error en el rellotges
- Efecte Ionosfèric
- Efecte Troposfèric
- Errors orbitals
- Multipath
- Disponibilitat Selectiva

3.3 Sistemes GNSS existents

Un cop s'ha parlat de les característiques que han de tenir els GNSS, s'estudiarà en detall dos dels sistemes GNSS existents: el GPS i el GALILEO.

3.3.1 Global Positioning System (GPS)

Els sistemes de posicionament van ser un dels grans avanços tecnològics en l'últim quart del segle vint. El que va començar com una carrera d'avanços militars entre E.E.U.U i la U.R.S.S durant la guerra freda, en el moment actual està tenint un gran impacte en el món civil.

El Global Positioning System (GPS) és un sistema de navegació basat en satèl·lit que va ser desenvolupat per el Departament de Defensa dels E.E.U.U en el començament dels anys 1970. Inicialment aquest sistema va ser desenvolupat per tasques militars però més endavant el van fer disponible per als civils.

El NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System) o més conegut com GPS, és un Sistema de navegació per satèl·lit (GNSS) que determina la posició d'un objecte o persona en qualsevol punt del món amb una exactitud de metres o fins i tot centímetres depenent de la tecnologia que es faci servir.

Els primers satèl·lits van ser llançats el febrer de l'any 1978 i en el setembre del 1993, el sistema GPS ja disposava de 24 satèl·lits operatius però actualment

en són 31. Estan situats en òrbites circulars inclinades 55° respecte el l'equador. Quatre "slots"³ estan continguts en cada una dels sis plans orbitals amb un radi d'òrbita de 26.559,7 Km.

Com s'ha vist en l'anterior punt, tot sistema GNSS ha de tenir tres segments, i ara es parlarà en detall de cadascun d'ells. Seguidament es veuran les característiques principals del senyal GPS i les seves prestacions

3.3.1.1 Senyal GPS

En aquesta part es presentarà l'estructura del senyal que transmet el satèl·lit per l'espai, analitzant les seves característiques i paràmetres principals i es veurà com, finalment, s'ajunten totes per tal de formar el senyal GPS que acaba arribant a cada receptor.

Cada satèl·lit transmet un senyal compost per dos freqüències portadores modulades per dos codis digitals i un missatge de navegació. És a dir, el missatge de navegació es superposa al codi C/A o P(Y) (es parlarà més endavant) i tant el missatge de navegació com el codi es modulen a la portadora de radiofreqüència mitjançant una modulació BPSK. Els codis C/A i P(Y) de les portadores són utilitzats, principalment, per determinar la pseudo distància entre el receptor i el satèl·lit. En canvi, el missatge de navegació conté, entre altre informació, les coordenades del satèl·lit. A continuació es parlarà en detall de cada component del senyal GPS.

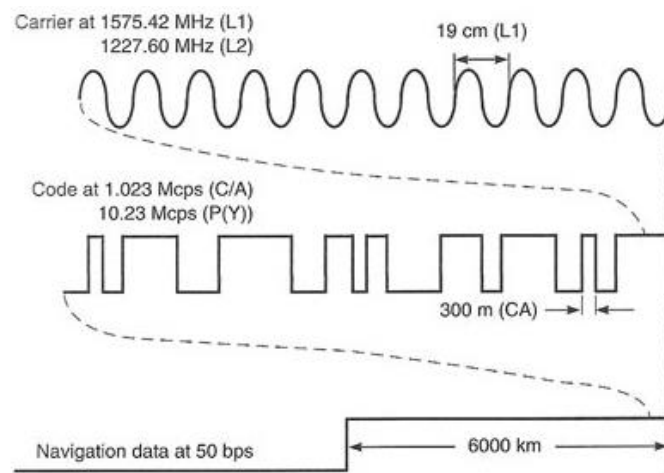


Figura 3.7: Components senyal GPS

³ Slot: fa referència a l'espai on està col·locat el satèl·lit

- Freqüència portadora

Té la funció de modular i transportar el missatge de navegació i els codis. El sistema GPS utilitza tres bandes freqüencials per transmetre el senyal GPS i es transmetrà en una o varies d'elles en funció de l'aplicació que es vulgui utilitzar.

Aquestes tres freqüències estan ubicades en la banda L (entre 1000 MHz i 2000 MHz) de la regió UHF (Ultra High Frequency) de l'espectre electromagnètic. Les tres bandes estan referenciades amb la nomenclatura L1, L2 i L5 i deriven d'una freqüència en comú, utilitzada per l'oscil·lador atòmic del satèl·lit a una $f_0 = 10,23 \text{ MHz}$.

Tots els satèl·lits GPS generen les mateixes freqüències portadores L1 i L2. Si el receptor té la possibilitat d'utilitzar les dues freqüències alhora això li permetrà tenir major exactitud en el càlcul de la posició. S'estudiarà en detall en el punt 5 d'aquest treball.

Les bandes utilitzades en les que es troben aquestes freqüències són:

L1: banda centrada en la freqüència portadora $f_{L1} = 154f_0 = 1575,42 \text{ MHz}$ i té una longitud d'ona de $\lambda = 19,00 \text{ cm}$, és a dir, la distància entre pic i pic. Els codis C/A i P estan modulats en aquesta banda freqüencial

L2: banda centrada en la freqüència portadora $f_{L2} = 120f_0 = 1227,60 \text{ MHz}$ i té una longitud d'ona de $\lambda = 24,40 \text{ cm}$. El codi P està modulats en aquesta banda freqüencial.

- Missatge de navegació

El missatge de navegació són les dades que s'afegeixen en les freqüències portadores L1 i L2 mitjançant una modulació BPSK a una taxa de 50 kbps.

El missatge de navegació proporciona al receptor informació necessària per poder calcular la seva posició. Aquest missatge entre altres informacions els efemèrids, necessaris per saber les coordenades del satèl·lit, el temps de transmissió del senyal i les correccions del rellotge del satèl·lit, paràmetres del model ionosfèric, l'almanac⁴, etc.. A continuació s'indiquen la informació que inclou cada trama del missatge de navegació de la L1 C/A [30]:

- Sub trama 1: conté informació sobre l'estat del rellotge del satèl·lit i paràmetres per poder aplicar les correccions d'aquest rellotge.
- Sub trama 2 i 3: conté informació sobre les efemèrides del satèl·lit.

⁴ Almanac: informació enviada de forma periòdica per els satèl·lits de la constel·lació, informant sobre els seus estats i de la resta de satèl·lits.

- Sub trama 4: inclou els paràmetres del model ionosfèric per tal de que l'apliqui el receptor i informació *UTC (Universal Coordinate Time)* que indica el temps de manera molt exacta.
- Sub trama 5: conté les dades de l'almanac.

Aquest missatge de navegació, com s'ha comentat, es transmet utilitzant una modulació BPSK a 50 bps. El missatge de navegació el formen 25 trames de 1500 bits cadascuna, per tant fan un total de 37500 bits. Tenint la taxa de bit es pot calcular el temps en transmetre una trama:

$$Tassa_{bit} = 50 \text{ bits/s}$$

$$Temps_{tx_1_trama} = \frac{Bit_{trama}}{Tassa_{bit}} \quad (3.2)$$

$$Temps_{tx_1_trama} = \frac{1500 \text{ bits}}{50 \text{ bits/s}} = 30 \text{ s}$$

Cadascuna d'aquestes trames triga 30 segons en transmetre, per tant si es multiplica per les 25 trames que conté el missatge de navegació fa un total de 750 segons o 12,50 minuts per transmetre el missatge de navegació complet. Tot dependrà de la informació que ja disposi el receptor GPS.

L'almanac només és vàlid 90 dies i les efemèrides tant sols unes poques hores, per tant si el receptor ha estat molt de temps sense fer-se servir i l'almanac que té ja no li és vàlid, per tant haurà d'esperar els 12,50 minuts en rebre totes les trames. En canvi si el receptor es fa servir habitualment l'almanac que té ja li serveix i no li cal esperar a rebre totes les trames. És habitual que els receptors GPS tinguin accés a internet i gràcies a aquesta connexió són capaços de descarregar l'almanac i obtenir la posició en 10-20 segons. En cas de que no es disposi de connexió a internet i s'utilitzi habitualment sol trigar entre els 5-7 minuts en calcular la posició.

- Codi Pseudoaleatori

Existeixen dos tipus de codis anomenats Coarse Acquisition (C/A) i *Precision code* (codi P). Els dos són seqüències binàries de zeros i uns i són coneguts com codis *Pseudorandom Noise Code (PRN)* ja que semblen senyals aleatòries, però en realitat per generar aquest codi s'han hagut d'utilitzar algorismes matemàtics. Cada satèl·lit té assignats aquests dos codis i són diferents de la resta de satèl·lits per tant cadascun identifica al satèl·lit que l'ha enviat. A continuació es detallen cadascun d'ells:

Codi C/A (Coarse/acquisition code)

Cada satèl·lit té assignat un codi diferent i consisteix en una seqüència binària de zeros i uns de 1023 dígits que es repeteix cada mil·lisegon. Aquest codi té una taxa de transmissió de 1,023 Mbps i només està modulada a la portadora

L1. Si dividim la taxa de chip entre la velocitat de la llum obtenim la seva longitud d'ona: 300 metres.

Aquests codis presenten propietats molt bones per l'adquisició del senyal del satèl·lit per part del receptor. Una de les millors propietats d'aquest codi és que els codis C/A estan pràcticament incorrelats amb la resta, és a dir, presenten nivells de correlació creuada molt baixos. En canvi, si es realitza l'autocorrelació d'un codi determinat s'obtindrà un pic de gran amplitud. Això permet que els satèl·lits puguin transmetre a la mateixa freqüència ja que els codis que emeten són ortogonals entre ells. Aquests codis presenten una alta autocorrelació quan no hi ha desfasament i presenten valors molt baixos de correlació creuada.

L'autocorrelació consisteix en correlar una seqüència amb una còpia de si mateixa. Si aquesta còpia no es desplaça, és a dir, està totalment alineada amb la seqüència original, se suma 1 per cada dígit que coincideix, per tant, per una seqüència PRN de 1023 dígits la seva autocorrelació (sense normalitzar) serà de 1023, que és el nombre de dígits que té aquest codi. En canvi, si es compara aquesta seqüència amb una còpia de si mateixa però desplaçada, el resultat acabarà donant 0 ja que no estaran alineades. Finalment, la suma total serà pràcticament zero.

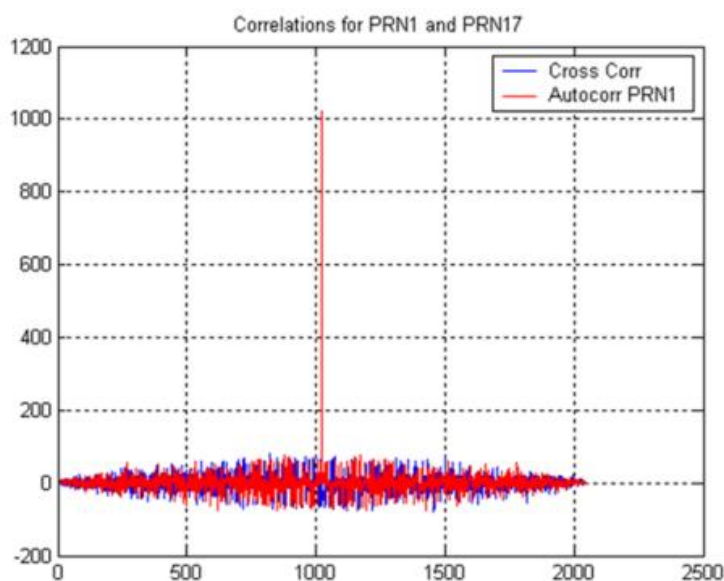


Figura 3.8: Autocorrelació i correlació creuada de codis PRN

Si s'utilitza aquest codi per el càlcul de la distància que separa el satèl·lit del receptor l'exactitud que s'obtindrà és menor que en el cas d'utilitzar el codi P. Però en canvi, el codi C/A és menys complex i és accessible per a tots els usuaris.

El servei GPS que fa servir aquest codi és l'anomenat *Standard Positioning Service (SPS)*.

Codi de precisió (codi P)

El codi P també és un codi *PRN* i està modulat tant en L1 com en L2. Té una taxa de transmissió de 10,23 Mbps, deu vegades més que el codi C/A i la seva longitud d'ona és de 30 cm fet que el fa que sigui un codi més exacte que el C/A. Es tracta d'un codi utilitzat per fins militars i pot ser encriptat.

Cada satèl·lit té un codi diferent i transmet una seqüència de $6,18 \cdot 10^{12}$ bits cada setmana. Aquest codi és una petita porció del codi P total que té una longitud de $2,35 \cdot 10^{14}$ bits, per tant es repeteixen les seqüències fins les 38 setmanes. Es tracta d'un codi més difícil d'adquirir que no pas el C/A, per lo que els receptors solen començar adquirint el codi C/A per després passar al P.

El servei GPS que fa servir aquest codi és l'anomenat *Precise Positioning Service (PPS)*.

3.3.1.2 Observables GPS

Com s'ha pogut veure anteriorment, per determinar la posició d'un receptor mitjançant el GPS es necessita obtenir el valor de la distància entre un mínim de quatre satèl·lits i el receptor.

El concepte d'observable GPS vol dir la mesura d'aquesta distància calculada a partir de mesures de temps o amb les diferències de fase comparant el senyal que rep el receptor procedent del satèl·lit i una rèplica d'aquesta senyal que genera el receptor. N'hi ha de dos tipus: les mesures de codi i les mesures de fase.

Mesures de codi

S'assumirà que tant el rellotge del satèl·lit com el del receptor estan perfectament sincronitzats entre ells. Cada satèl·lit transmet una seqüència PRN diferent i ortogonal als altres satèl·lits i el receptor genera contínuament el codi de cada satèl·lit internament. Un cop el receptor rep el senyal enviada per un satèl·lit, realitza la correlació entre aquesta i la que ha generat internament.

Degut a les característiques del senyal GPS, l'autocorrelació del senyal només obtindrà un màxim quan les dues seqüències estiguin alineades. El receptor realitza la correlació dels dos senyals fins que obté el màxim. Si no l'obté, voldrà dir que no estan alineades, en aquest cas el receptor va desplaçant el codi que ha generat internament Δt fins que obtingui doni com a resultat un màxim en la correlació.

El receptor agafarà el valor de Δt i el multiplicarà per la velocitat de la llum, i d'aquesta manera obtindrà la pseudo distància que el separa amb el satèl·lit que ha generat el senyal rebuda. Si el receptor està realitzant la correlació del codi PRN d'un satèl·lit amb una còpia d'un codi PRN d'un altre, no hi haurà correlació ja que no es produirà mai un pic, el valor serà al voltant de zero (baix valor de correlació creuada).

Lamentablement, assumir que els dos rellotges estan completament sincronitzats no és real. De fet, la distància que es mesura mitjançant aquest mètode no serà la distància real ja que, entre altres errors, tindrem un error de sincronització entre els dos rellotges. Per aquest motiu, el rang que es calcula amb aquest mètode no es diu distància sinó pseudo distància. En la següent imatge es pot veure el procés de correlació.

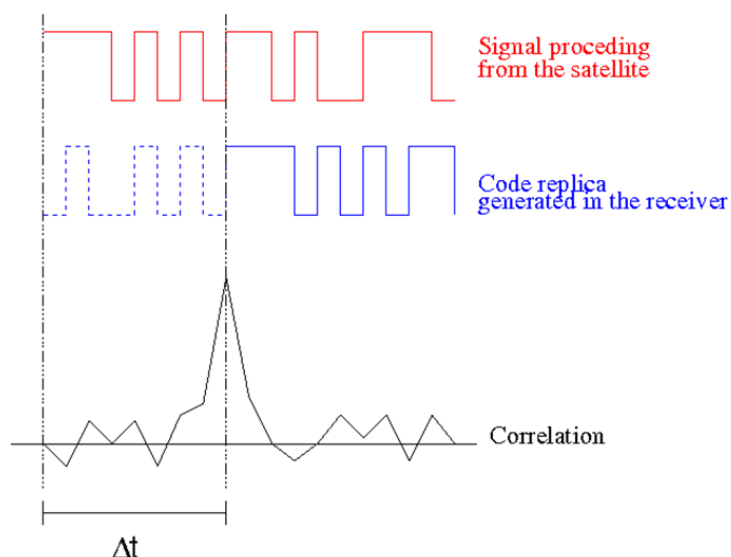


Figura 3.9: Correlació entre el codi rebut i el codi generat internament per el receptor [31]

Es pot observar com en el cas de que els dos codis encaixin, s'obté un pic de correlació i en cas de que no hi hagi coincidència la correlació és al voltant de zero.

En cas de fer servir el codi P, s'obindrà major exactitud en la posició ja que aquest té major velocitat en la taxa de bit i també perquè es pot eliminar l'error que provoca la ionosfera al senyal GPS fent servir les dues freqüències L1 i L2.

3.3.1.3 Mesura de fase

S'ha vist com per calcular la pseudo distància es fa mesurant el temps de propagació amb ajuda dels codis C/A i P però en canvi aquest mètode de càlcul de distàncies es fa mesura el desfasament de l'ona portadora.

Aquest mètode consisteix en mesurar la fase del senyal que arriba al receptor procedent del satèl·lit i comparar-la amb la fase del senyal generat internament el receptor. La distància que separa el receptor del satèl·lit seria la suma de tots els cicles de la portadora complets per la longitud d'ona més la diferència de fases entre el senyal rebuda i la generada multiplicada per la velocitat de la llum. S'ha de tenir en compte que la següent fórmula no té en compte els errors que pateix el senyal des de que el transmet el satèl·lit fins que el rep el receptor:

$$Distància_{satèl·lit-receptor} = c \cdot \Delta\varphi + \lambda \cdot N \quad (3.1)$$

Si s'obté un canvi en la fase voldrà dir un canvi en la distància entre el satèl·lit i el receptor i en funció del canvi de fase positiu o negatiu es podrà saber si el satèl·lit s'apropa o s'allunya.

Aquesta tècnica té un problema i és que el receptor GPS quan s'inicia no és capaç de determinar el nombre total de cicles complets entre el satèl·lit i el receptor, per tant aquest valor queda com una ambigüitat.

3.3.2 GALILEO: el nou sistema europeu de navegació

Galileo és un sistema global de navegació per satèl·lit de caràcter civil de la Unió Europea. Permet a usuaris de tot el món conèixer la seva posició en el temps i en l'espai amb una gran precisió i fiabilitat. Un cop estigui completat, comptarà amb 24 satèl·lits operatius i una infraestructura de terra per la provisió de serveis de posicionament, navegació i determinació de la hora. Actualment es compten amb 17 satèl·lits operatius.

Galileo està finançat per la UE, que es la propietària del programa. El seu responsable és la Comissió Europea i són qui s'encarreguen de supervisar i gestionar la implementació de totes les seves activitats. La Comissió Europea va encarregar a la Agència Espacial Europea (ESA) del disseny, desenvolupament i implementació de la nova generació de sistemes.

El programa GALILEO és una iniciativa conjunta de la Comissió Europea conjuntament amb l'Agència Espacial Europea, en la que han participat multitud d'empreses de diferents països de la Unió Europea.

Galileo s'ha plantejat com un sistema que permeti ser independent a Europa del GPS i el GLONASS, però que alhora sigui complementari amb els dos i permeti la interoperabilitat amb aquests. Quan el projecte estigui complet tindrà un total de 30 satèl·lits que conjuntament amb els de GPS i GLONASS permetrà obtenir posicionaments molt precisos.

És un GNSS fet a Europa i per Europa. Va néixer per la inseguretat d'Europa en cas d'haver un conflicte internacional ja que tant Estats Units com Rússia podrien dificultar l'accés al seu sistema de posicionament fent que tots els serveis de posicionament a Europa quedessin inutilitzats. Per això es va voler crear un sistema que fos independent als GNSS d'Estats Units i de Rússia. A més, es va voler crear un sistema de posicionament que millorés les precisions que ofereixen els sistemes de posicionament actuals.

3.3.2.1 Serveis Galileo

Galileo actualment ofereix tres tipus de serveis que amb el temps milloraran la seva disponibilitat gràcies a completar la constel·lació.

- Servei Obert (OS):

És un servei general gratuït per a tots els usuaris que estiguin equipats amb receptors Galileo, com els smartphones i sistemes de navegació per a cotxes. Al ser un servei totalment compatible amb GPS, la seva cobertura combinada permetrà oferir un posicionament més precís i fiable.

- Servei Comercial (SC):

És un servei que proporciona accés a dos senyals addicionals que permeten una major transferència de dades i millora de la precisió. Aquest parell de senyals estan protegides mitjançant un xifrat comercial.

- Servei de Salvament (SoL):

Servei que millora el rendiment del OS gràcies a l'enviament d'una alerta als usuaris quan es produeix un error i superen els marges establerts (integritat).

- Servei públic Regulat (PRS):

ÉS un servei robust i xifrat per a usuaris que necessitin una alta continuïtat del servei amb autorització governamental com poden ser Protecció Civil, bombers o la policia.

- Servei de Búsqueda i Salvament (SAR)

Amb aquest servei Europa contribueix al sistema internacional de senyals de socor Cospas-Sarsat que porta dècades en funcionament. Gràcies al SAR, permetrà que el temps des de que s'ubica una senyal d'emergència marítima o en camp obert es veurà reduït d'un màxim de tres hores a tan sols 10 minuts i reduint el radi de 10 km a 5 Km.

3.3.2.2 *Senyals Galileo*

Galileo envia tres freqüències diferents dins de la banda L, anomenades E1, E5 i E6, modulades amb codi obert i un codi xifrat per els serveis comercials i governamental. Aquestes senyals es diferencien mitjançant tècniques d'accés múltiple per divisió de codi (CDMA). Un total de 10 senyals, E1A, E1B, E1C, E6A, E6B, E6C, E5a-1, E5a-Q, E5b-1 i E5b-Q seran transmeses per proporcionar els diferents serveis.

Totes les senyals Galileo estan per parelles, excepte la E1A i E6A. Els canals A i B corresponen a senyals de dades i els canals Q i C a senyals pilot.

El OS de Galileo està definit per tres senyals: E1, centrada a 1575,42 MHz i E5a i E5b, centrades a 1176,45 MHz i 1207,14 MHz respectivament, amb els seus respectius canals de dades i pilot.

El senyal E1 es compon per dos components modulades amb $CBOC(6,1,1/11)$: conté una component de dades (E1-B) amb una taxa de bit de 125 bps i una component que no conté dades (E1-C).

El senyal E5 la formen quatre components multiplexades i modulades amb $AltBOC(15,10)$: conté un parell de components a la portadora E5a. Una component de dades (E5a-1) amb una taxa de bit de 25 bps i una component sense dades (E5a-Q). Per últim conté un altre parell de components a la portadora E5b. Una component de dades (E5b-1) amb una taxa de bit de 125 bps i una component sense dades (E5b-Q).

Per últim tenim el senyal E6 que es compon per dos components modulades amb $BPSK(5)$: conté una component de dades (E6-AC) i una component sense dades (E6-A).

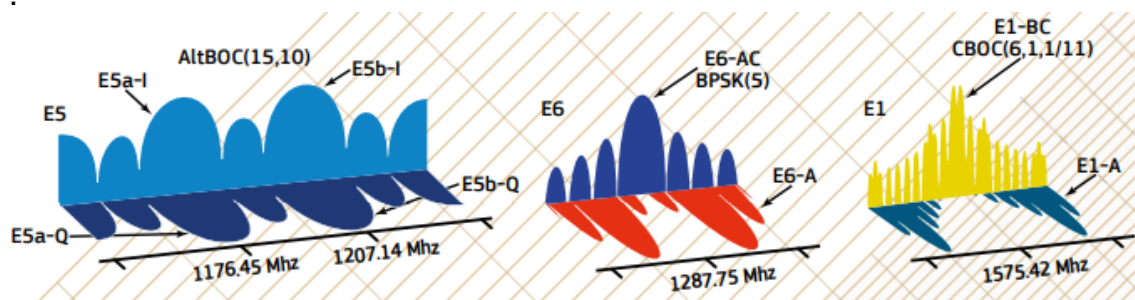


Figura 3.10: Bandes freqüencials Galileo [23]

Actualment (Agost 2018) hi ha un total de 17 satèl·lits operatius que ofereixen els serveis Galileo. Per el servei OS tenim la següent taula extreta del document oficial que mostra la disponibilitat depenent del nombre de satèl·lits que hi ha.

SERVICE SIS	NUMBER OF SATELLITES		
	9	15	24
DF E5a/E1	>87%	>96%	>99.5%
DF E5b/E1	>87%	>96%	>99.5%
SF E1	>87%	>96%	>99.5%
SF E5a	>87%	>96%	>99.5%
SF E5b	>87%	>96%	>99.5%

Figura 3.11: Disponibilitat sistema Galileo en funció dels satèl·lits operatius [23]

Els senyals Galileo, a diferència dels senyals GPS, introdueixen un tipus de senyals compostes anomenades senyals pilot. Aquests senyals són transmesos ortogonalment amb els senyals de dades, que no contenen dades de navegació però sí un breu codi secundari. El principal avantatge d'aquests senyals és que mentre el canal de dades conté la informació de les efemèrides i la informació de la constel·lació de satèl·lits (almanac), el canal pilot pot integrar-se durant períodes més llargs sense creuar transicions de dades fet que milloraria en els senyals rebuts la portadora-soroll.

Les modulacions que fan servir els senyals Galileo tenen una funció d'autocorrelació amb un pic més estret en comparació a les senyals GPS i això fa que sigui més robust enfront un entorn amb multipath. Si l'escenari on es troba un receptor és un escenari amb multipath, un receptor que faci servir el senyal GPS no sabrà diferenciar quin és el senyal directe i agafarà un valor del retard erroni ja que els pics es trobaran molt junts. En canvi, el sistema Galileo és més robust enfront al multipath ja que els pics són més estrets i es trobaran més separats i d'aquesta manera el receptor podrà diferenciar quin és el pic del senyal directe i no agafarà un valor erroni del retard.

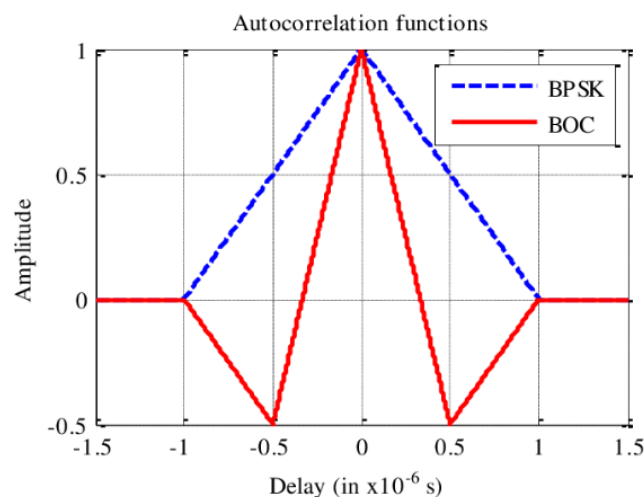


Figura 3.12: Funció d'autocorrelació del senyal GPS (color blau) i de Galileo (color vermell)

La *European GNSS Service Center (GSC)* va presentar a la seva web [22] un informe del primer quart de l'any 2018 on es veu l'error en la posició horitzontal d'un receptor Galileo fent servir l'Open Service amb doble freqüència E1/E5a.

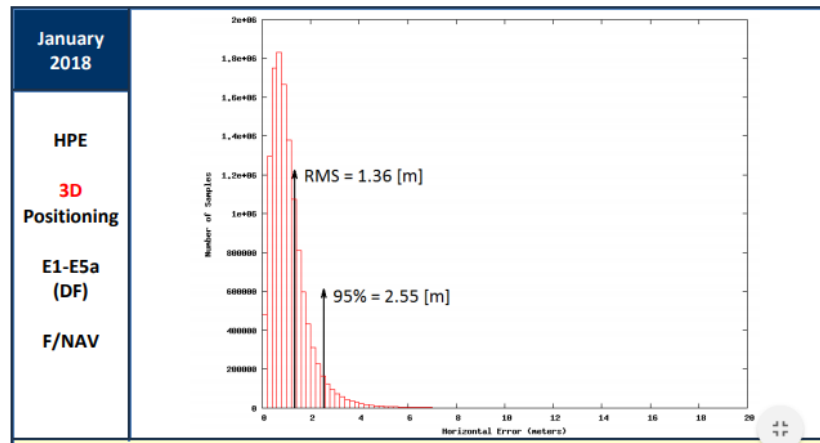


Figura 3.13: Horizontal Position Error (95%) en el cas de Galileo OS E1/E5a [22]

Es pot observar que el 95% del temps s'obtindrà un error igual o menor a 2,55 m en la posició calculada per el receptor.

En el document *Galileo Open Service, SERVICE DEFINITION DOCUMENT*[23] es mostren les dades que s'espera obtenir amb el servei *Open Service* de Galileo en funció del nombre de satèl·lits. S'ha extret una taula on s'indiquen les exactituds en les posicions horitzontals i verticals (95%) en metres en funció de si s'està fent servir *Single Frequency (SF)* o *Dual Frequency (DF)*:

SERVICE		NUMBER OF SATELLITES		
		9	15	24
DF	H	5.0	3.3	1.8
	V	6.7	4.6	2.9
SF	H	19.3	14.1	7.7
	V	25.5	19.7	12.6

Figura 3.14: Expectatives d'exactituds de posició horitzontal i vertical (95%) en metres fent servir *SF* o *DF* en funció del número de satèl·lits operatius [23]

Actualment (Agost 2018) al tenir 17 satèl·lits operatius en l'espai, l'exactitud horitzontal que ens dona l'OS per un receptor fent servir *SF* és entre 14,10 m i 7,70 m i en el cas de fer servir *DF* entre 3,30 m i 1,80 m. Aquestes dades s'aproximen als 2,55 m que es van obtenir al Gener del 2018 en la **Figura 3.13**.

Fent servir el servei *Open Service* amb tots els satèl·lits operatius (24), s'espera obtenir una exactitud en la posició horitzontal el 95% del temps fent servir *DF* de 1,80 m. Com s'ha vist, Galileo també ofereix un servei amb major exactitud anomenat *Commercial Service (CS)*. La finalitat d'aquest servei és proporcionar major exactitud en les mesures. En l'actualitat aquest servei no es troba operatiu per lo que no hi han documents oficials on apareguin resultats. Tot i així s'espera que el servei *CS* proporcioni, quan estiguin tots els satèl·lits disponibles, una exactitud menor a 0,30 metres en la posició horitzontal (95%).

4. CÀLCUL D'ERRORS DE POSICIONAMENT

En aquest capítol s'analitzaran les fonts d'error que poden afectar al senyal GNSS, sense tenir en compte les condicionants de l'equip, metodologia o software utilitzat. Es diferenciarien en tres elements: satèl·lit, propagació del senyal i per últim el receptor i es quantificaran per poder calcular l'error que provoquen en el càlcul de la pseudo distància.

En aquest capítol tot i que el càlcul s'ha realitzat per el senyal GPS fent servir l'SPS (freqüència L1 i codi C/A), els comentaris són prou generals com per incloure tots els sistemes GNSS.

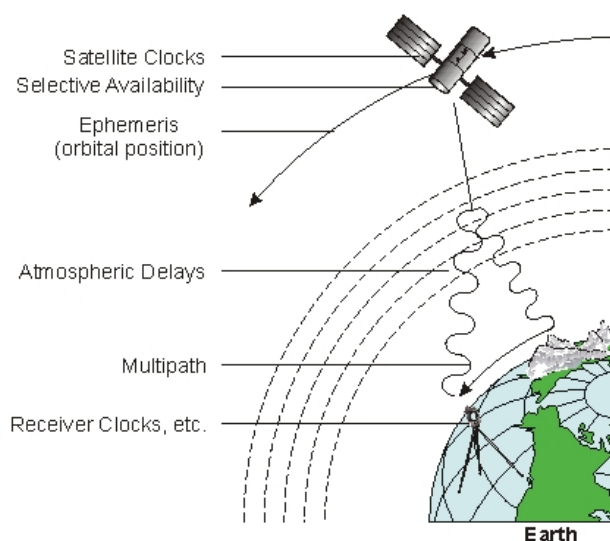


Figura 4.1: Fonts d'error del senyal GPS [27]

El senyal GPS des de que el transmet el satèl·lit fins que arriba al receptor és afectat per diferents fonts d'error que degraden el càlcul del posicionament per part del receptor. Entre altres fonts d'error que afecten al senyal GPS són les que apareixen en la **Figura 4.1** com poden ser l'error del rellotge del satèl·lit, la *Selective Availability (SA)*⁵, error en la posició orbital, provocats per l'atmosfera, per multipath, error en el rellotge del receptor, etc.. Existeixen més fonts d'error però s'estudiaran les que apareixen en la **Taula 4.1**:

⁵ *Selective Availability (SA)*: degradació intencionada del senyal per part del *Department of Defense (DoD)* dels EEUU per l'usuari civil. El 2 de maig de l'any 2000 gràcies al president dels EEUU Bill Clinton es va eliminar aquesta font d'error que degradava el senyal GPS als civils perquè poguessin tenir millor exactituds.

Taula 4.1: Fonts d'error del senyal GPS

Element	Font d'error
Satèl·lit	Error del rellotge
	Error en els paràmetres orbitals (efemèrides transmeses)
	S/A: Disponibilitat Selectiva
Propagació del senyal	Error ionosfèric
	Error troposfèric
	Multipath
Receptor	Error del rellotge
	Error instrumental

Per tal de calcular la pseudo distància es plantejarà un sistema de quatre equacions i quatre incògnites com el que s'ha esmentat en el capítol 3 però incloent els diferents errors presentats en la taula. D'aquesta manera es tindran en compte els errors que es produeixen tant en la propagació del senyal com els dependents del satèl·lit i del receptor

$$P_i^j = preal_i^j + c \cdot (dt_i - dt^j) + ionosfera_i^j + T_i^j + M_i^j + e_i^j \quad (4.1)$$

On:

P_i^j = Pseudo rang calculat entre "i" (receptor) i "j" (satèl·lit)

$preal_i^j$ = Distància real entre satèl·lit i receptor

dt_i = Diferència entre el temps GPS i el temps del receptor

dt^j = Diferència entre el temps GPS i el temps del satèl·lit

rel_i^j = Efectes relativistes entre el receptor i satèl·lit

$ionosfera_i^j$ = Retard ionosfèric

T_i^j = Retard Troposfèric

M_i^j = Retard per multipath

e_i^j = Soroll del receptor

Tot seguit s'analitzaran i quantificaran cadascun dels errors que s'han esmentat per veure quin error total introdueixen en el càlcul de la pseudo distància en el cas de fer servir el codi C/A.

4.1 Errors dependents del satèl·lit

4.1.1 Error del rellotge del satèl·lit

Aquest error és produït degut al desfasament que té el rellotge del satèl·lit respecte al *GPS Time (GPST)*⁶ o al *Galileo System Time (GST)*. Els satèl·lits GPS utilitzen rellotges molt més precisos que els receptors que hi han a la Terra. Cada satèl·lit té quatre rellotges atòmics, dos de cèssi i dos de rubidi. Els satèl·lits utilitzen rellotges atòmics perquè proporcionen molta estabilitat, concretament entre 1 a 2 parts en 10^{13} de període per dia.

Aquest rellotges atòmics són molt exactes, però poden patir algun error. Tenir un petit error en el rellotge del satèl·lit es pot traduir en un error significatiu en la pseudo distància ja que, per exemple, tenir un error en el rellotge del satèl·lit de 10 nanosegons equival a:

$$Error_{rellotge\ satèl\cdot lit} = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^8 = 3\text{ metres}$$

Els errors en els rellotges dels satèl·lits poden ser corregits gràcies a correccions enviades dins del missatge de navegació que rep cada receptor, les quals són calculades, enviades i actualitzades per les estacions de seguiment. Tot i així, és possible que hi hagi un petit error residual estimat en pocs nanosegons. Per a aquest estudi es considerarà un error residual de 3,3 nanosegons:

$$Error_{rellotge\ satèl\cdot lit} = 3,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^8 = 1\text{ metre}$$

4.1.2 Error en els paràmetres orbitals (efemèrides transmeses)

Les estacions de seguiment registren dades de mesures de codi i de fase que envien a la Estació de Control Principal, on calculen les futures posicions orbitals dels satèl·lits. Aquestes seran transmeses als receptors a través de les efemèrides dins del missatge de navegació. Però les efemèrides que transmeten els satèl·lits tindran un cert error ja que no és possible predir amb exactitud les seves posicions.

Un satèl·lit es pot desviar de la seva òrbita calculada per diferents raons com poden ser la variació del camp gravitatori, variació en la pressió de radiació solar i la fricció del satèl·lit amb molècules lliures. La Terra no és una esfera perfecta i la seva distribució de massa no és homogènia i pot afectar a la trajectòria del satèl·lit. Altres planetes, com el Sol i la Lluna, fan unes forces d'atracció sobre el satèl·lit, anomenat efecte del tercer cos. L'atracció gravitacional que exerceix aquest tercer cos afecta a l'òrbita del satèl·lit.

⁶ *GPS Time (GPST)*: en el sistema GPS el temps és definit i mantingut segons una escala continua pròpia definida per la *GPS Control Segment* donat per un rellotge compost que comprèn els rellotges de totes les *Monitor Stations* i els dels satèl·lits.

També afecta l'impacte de fotons de la llum emesa per el sol, anomenat efecte albedo. És conegut com pressió de radiació solar i serà en funció de l'àrea d'exposició a la radiació del satèl·lit, superfície de reflectivitat, lluminositat del Sol i la distància al Sol.

L'estació de control que trobem a la Terra constantment monitoritza l'òrbita dels satèl·lits. Quan el satèl·lit canvia la seva òrbita, l'estació de control de terra envia una correcció als satèl·lits i d'aquesta manera s'actualitzen les efemèrides dels satèl·lits.

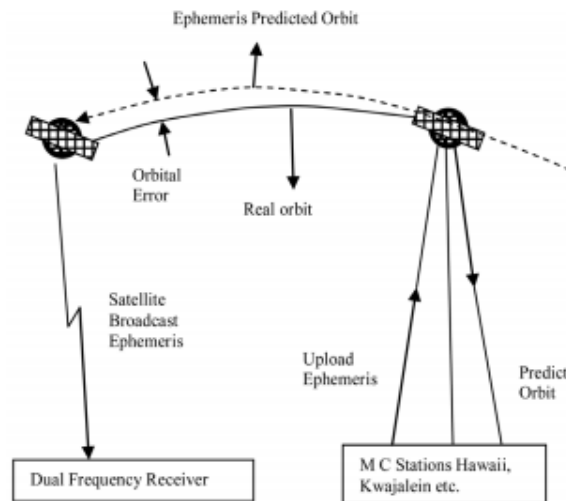


Figura 4.2: Error orbital del satèl·lit [39]

En la **Figura 4.2** es pot veure el que seria la òrbita predita del satèl·lit i la real. Tot i aplicar les correccions de les efemèrides dels satèl·lits és possible tenir un error. Per a aquesta font d'error es suposarà que el satèl·lit s'ha desviat de la seva òrbita provocant un error de 8,3 nanosegons, això equival a un error en metres de:

$$Error_{orbital\ del\ satèl\cdot lit} = 8,3 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^8 = 2,5\ metres$$

Una altra manera d'evitar aquest error seria utilitzant les efemèrides precises⁷ que ens proporcionaria un sistema SBAS com el *European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)* i utilitzant tècniques diferencials. En aquest projecte es veurà com el sistema d'augment *EGNOS* millora les exactituds del sistema GPS, entre altres motius, perquè transmet les efemèrides precises i que corregeixen l'error orbital dels satèl·lits i d'aquesta manera eliminar la seva contribució d'error.

⁷ Efemèrides precises: un sistema SBAS envia, entre altres correccions, les efemèrides precises que es tracta d' efemèrides calculades per tal de garantir una major precisió.

4.2 Errors per retard de propagació

La velocitat de propagació del senyal és molt important per tal de mesurar distàncies. Aquesta velocitat, multiplicada per l'interval de temps que s'han propagat els senyals ens donarà una mesura d'aquesta distància. Si una ona electromagnètica es propaga per el buit, la seva velocitat de propagació serà la de la velocitat de la llum, independentment de la seva freqüència.

En el cas dels senyals GPS, aquestes tenen que travessar les capes de la atmosfera fins arribar al receptor que estarà posicionat sobre la superfície de la Terra. Aquestes senyals interaccionen amb partícules carregades, que provoquen un canvi en la seva velocitat i direcció de propagació, aquest fet s'anomena: refracció.

Quan un senyal viatja per un medi que no és el buit, aquesta pateix un retard, respecte a la que tindria en el buit, ja que la seva velocitat de propagació en aquell medi és menor a la del buit i la seva trajectòria augmenta ja que pateix una curvatura degut a la refracció.

A continuació estudiarem dos dels retards que pateixen les senyals GNSS al travessar l'atmosfera: el retard ionosfèric i el troposfèric.

4.2.1 Retard Ionosfèric

La ionosfera és una regió entre els 50-1000 Km de l'atmosfera, on la radiació solar i altres radiacions ionitzen una porció de les molècules gasoses alliberant electrons que creen un comportament de plasma i interfereixen en la propagació d'ones de radio. La densitat d'aquestes càrregues depenen de diversos factors com: la latitud, hora, estació de l'any i cicle solar i per tant, es pot estudiar, mesurar i realitzar prediccions.

La creació d'ions depèn de l'energia de les radiacions i de la densitat de les molècules. Per alçades elevades la energia de la radiació incident és elevada però la densitat de molècules és baixa, mentre que a alçades més baixes la densitat de molècules és alta però l'energia de les radiacions ha sigut absorbida en gran part, de tal manera que la densitat de ionització màxima es produeix en un punt entremig.

Es pot dividir la ionosfera en diferents capes. La primera capa, anomenada capa D, és la capa inferior. Aquesta capa s'estén entre els 50 i 90 Km d'alçada. La seva densitat de ionització augmenta ràpidament amb l'alçada i presenta grans variacions entre el dia i la nit. De fet, de nit pràcticament desapareix, per lo que habitualment es considera que aquesta capa és diürna.

La capa E és la zona mitjana compresa entre els 90 i 130 Km d'alçada. Té grans variacions de ionització per la nit conserva un nivell significatiu, per tant podem dir que el comportament d'aquesta capa està lligat als cicles solars. Té el màxim d'ionització durant el migdia en els mesos d'estiu en nivells entorn als $10^{11} \text{ electrons}/\text{m}^3$.

La capa F s'estén fins arribar als 130 Km d'altitud. Degut a que té diferent comportament depenen l'alçada, aquesta capa es divideix en dos: la capa F_1 que està compresa entre els 130 i 210 Km i la capa F_2 a partir dels 210 Km. Es pot observar en la figura com la capa F_1 desapareix durant la nit mentre que la capa F_2 manté nivells constants entre el dia i la nit.

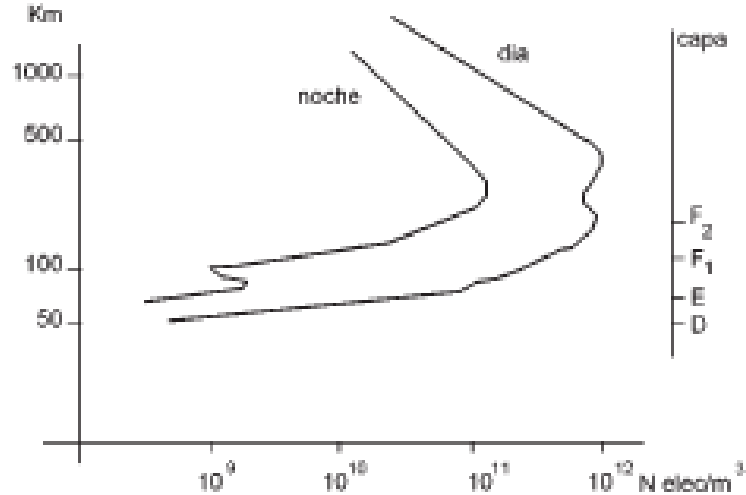


Figura 4.3: Densitat de ionització típica de la ionosfera [33]

El codi GPS és retardat resultant les pseudo distàncies de codi més llargues comparades amb la distància geomètrica existent al satèl·lit i les de fase més curtes.

Per tal de veure com afecta la ionosfera al retard del senyal GNSS s'haurà d'estudiar la propagació del senyal en un medi ionitzat. La propagació d'ones electromagnètiques en la ionosfera es pot modelar a partir de la propagació en plasmes. Un plasma és una regió de l'espai, amb la permitivitat elèctrica i permeabilitat magnètica del buit, que conté electrons lliures.

És possible definir la permitivitat elèctrica relativa i la conductivitat del plasma com [33]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \quad \text{amb} \quad \varepsilon' = 1 - \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(v^2 + \omega^2)} \quad i \quad \sigma = \frac{Ne^2v}{m(v^2 + \omega^2)} \quad (4.2)$$

En absència de col·lisions entre ions ($v = 0$) les expressions anteriors els poden expressar com:

$$\varepsilon' = 1 - \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega^2)} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2} \quad (4.3)$$

On f_p és la freqüència de ressonància del plasma:

$$f_p^2 = \left(\frac{w_p}{2\pi}\right)^2 = \frac{Ne^2}{(2\pi)^2 m \epsilon_0} \quad 4.4$$

Si substituïm les constants per el seu valor, obtenim l'expressió:

$$f_p = 9\sqrt{N} \quad 4.5$$

On N és la densitat de ionització en electrons/ m^3

Un cop vist i definit els conceptes anteriors, es pot dur a terme el càlcul aproximat de l'error produït per la ionosfera. Es realitzarà un càlcul del retard ionosfèric on s'utilitzarà un màxim i un mínim de la freqüència de plasma [33]. Com ja s'ha definit anteriorment f_p , s'escollirà com a valor mínim de la densitat d'ionització 10^{10} electrons/ m^3 i com a màxim 10^{11} electrons/ m^3 a una alçada de la ionosfera de 400 Km.

$$n \cdot \sin 90 = n \sqrt{\epsilon'} = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}} \quad 4.6$$

$$f_{pmin} = 9\sqrt{N_{min}} = 9\sqrt{1,234567 \cdot 10^{10}} = 1 \text{ MHz}$$

$$f_{pmax} = 9\sqrt{N_{max}} = 9\sqrt{6,049383^{11}} = 7 \text{ MHz}$$

Un cop s'obtenen els valors màxim i mínim de la f_p , es calcularà l'índex de refracció agafant com a f la freqüència del senyal GPS L1 (1,575GHz):

$$n_1(f_{pmin} = 1 \text{ MHz}) = \sqrt{1 - \frac{f_{pmin}^2}{f^2}} = \sqrt{1 - \frac{(1 \cdot 10^6)^2}{(1,575 \cdot 10^9)^2}} = 0,9999997984$$

$$n_2(f_{pmax} = 7 \text{ MHz}) = \sqrt{1 - \frac{f_{pmax}^2}{f^2}} = \sqrt{1 - \frac{(7 \cdot 10^6)^2}{(1,575 \cdot 10^9)^2}} = 0,9999901234$$

Per tal de calcular el temps que triga el senyal en passar la capa estarà en funció de l'índex de refracció calculat (n), l'alçada de la capa (h) que l'aproximarem a 400 Km i la velocitat de la llum (c):

$$t_x = \frac{h \cdot n_x}{c} \quad (4.7)$$

Per tant, al tenir dos índex de refracció, calculem els dos temps:

$$t_1 = \frac{h \cdot n_1}{c} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot 0,9999997984}{3 \cdot 10^8} = 1,666666331 \text{ ms}$$

$$t_2 = \frac{h \cdot n_2}{c} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot 0,9999901234}{3 \cdot 10^8} = 1,666650206 \text{ ms}$$

Ara es calcularà el retard total, que seria la diferència entre els dos temps:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 16,125 \text{ ns}$$

Si ara es multiplica aquest retard per la velocitat de la llum s'obté l'error aproximat de la posició amb els valors que s'han utilitzat:

$$\Delta x = 16,125 \text{ ns} \cdot 3 \cdot 10^8 = 4,8375 \text{ m}$$

Dona com a resultat un error en pseudo distància de 5 metres. La refracció ionosfèrica es pot suprimir fins a un 98% utilitzant receptors de doble freqüència. Però si s'utilitzen receptors GPS d'una freqüència, existeix un model ionosfèric que proporciona correccions de la refracció ionosfèrica, l'anomenat *Model Klobuchar*. En el missatge de navegació s'inclouen paràmetres d'aquests model per tal de reduir l'efecte tot i que només és capaç de reduir fins a la meitat del seu error.

4.2.2 Retard Troposfèric

La troposfera és la capa més baixa de l'atmosfera (fins als 80 Km, però només en els últims 40 Km es produeixen retards significatius). Aquesta capa conté vapor d'aigua, lo que significa que l'índex de refracció per a una àrea serà en funció de la seva temperatura, pressió i vapor d'aigua.

L'espessor d'aquesta capa no serà la mateixa en totes les zones. És una atmosfera neutre i un medi no dispersiu respecte a les ones de radio de freqüències superiors a 15 GHz, per tant, la propagació dels senyals és independent de la freqüència i això fa que no sigui possible reduir l'efecte troposfèric mitjançant la doble freqüència com es pot fer amb la ionosfera (medi dispersiu).

El retard troposfèric que pateix una senyal des de que l'emet el satèl·lit fins que la rep el receptor al llarg del camí recorregut per el senyal ($s = D_{sat-rec}$), es pot expressar en primera aproximació per la següent integral [34] :

$$\Delta^{trop} = \int (n - 1) ds \quad (4.8)$$

Normalment es fa servir la refractivitat en comptes de l'índex de refracció:

$$N^{trop} = 10^6(n - 1) \quad (4.9)$$

Si substituïm a l'equació anterior ens queda:

$$\Delta^{trop} = 10^6 \int N^{trop} ds \quad (4.10)$$

Aquesta integral pot ser avaluada coneixent l'índex de refracció o pot ser aproximada per funcions analítiques. Però se sol utilitzar aproximacions basades en models atmosfèrics simplificats. Alguns d'aquests models són: model de Hopfield (1969), model de Saastoinen (1972), model de Hopfield modificat, model Goad i Goodman(1974), etc.

Per fer una estimació del retard troposfèric i així compensar l'efecte, s'utilitzarà el model Saastamoinen [35] utilitzant paràmetres d'una atmosfera estàndard a nivell del mar. Aquest model suposa que l'atmosfera es comporta seguint la Llei dels Gasos Perfectes. El model de Saastamoinen per el retard troposfèric, expressat en metres, és:

$$D_z^{trop} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (4.11)$$

On:

D_z^{trop} = error troposfèric en metres

z = angle zenital del satèl·lit

P = pressió atmosfèrica (mbar)

T = temperatura (K)

e = pressió parcial del vapor d'aigua (mbar)

$B, \delta R$ = correccions depenents de l'alçada i l'angle

Per tal de fer el càlcul, s'ha de tenir en compte paràmetres d'una atmosfera estàndard:

$$p = p_{ref} \cdot (1 - 0,00000226 \cdot (h - h_{ref}))^{5,225} \quad (4.12)$$

$$T = T_{ref} - 0,0625 \cdot (h - h_{ref})$$

$$R_h = R_{h0} \cdot e^{-0,000006396 \cdot (h - h_{ref})}$$

$$e = R_h^{-37,2465 + 0,213166T - 0,000256908T^2}$$

On:

$$p_{ref} = 1013,25 \text{ mbar}$$

$$T_{ref} = 18^\circ\text{C}$$

$$h_{ref} = 0 \text{ m}$$

$$R_{h0} = 50\%$$

$$h = \text{alçada de l'estació}$$

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,16$$

Per els valors de $B, \delta R$ es farà servir la següent taula en la que està en funció de l'alçada a nivell del mar. S'agafarà com a valor 100 metres.

		Height (km)	z (degree)												
Height (km)	B (mbar)		60.00	66.00	70.00	73.00	75.00	76.00	77.00	78.00	78.50	79.00	79.50	79.75	80.00
0.0	1.156														
0.5	1.079	0.0	0.003	0.006	0.012	0.020	0.031	0.039	0.050	0.065	0.075	0.087	0.102	0.111	0.121
1.0	1.006	0.5	0.003	0.006	0.011	0.018	0.028	0.035	0.045	0.059	0.068	0.079	0.093	0.101	0.110
1.5	0.938	1.0	0.002	0.005	0.010	0.017	0.025	0.032	0.041	0.054	0.062	0.072	0.085	0.092	0.100
2.0	0.874	1.5	0.002	0.005	0.009	0.015	0.023	0.029	0.037	0.049	0.056	0.065	0.077	0.083	0.091
2.5	0.813	2.0	0.002	0.004	0.008	0.013	0.021	0.026	0.033	0.044	0.051	0.059	0.070	0.076	0.083
3.0	0.757	3.0	0.002	0.003	0.006	0.011	0.017	0.021	0.027	0.036	0.042	0.049	0.058	0.063	0.068
4.0	0.654	4.0	0.001	0.003	0.005	0.009	0.014	0.017	0.022	0.030	0.034	0.040	0.047	0.052	0.056
5.0	0.563	5.0	0.001	0.002	0.004	0.007	0.011	0.014	0.018	0.024	0.028	0.033	0.039	0.043	0.047

Figura 4.4: Taula de valors de B i δR en funció de l'alçada [36]

La pressió del vapor d'aigua e , és difícil de mesurar, per lo que normalment no es prenen mesures, sinó que es proposen els valors corresponents al nivell del mar al lloc d'observació en funció de l'altura de la estació.

Per fer el càlcul s'utilitzaran les dades d'atmosfera estàndard i que l'estació es troba a $h = 100 \text{ m}$ del nivell del mar i l'angle zenital del satèl·lit és $z = 30^{\circ}$, per tant:

$$p = p_{ref} \cdot (1 - 0,00000226 \cdot (h - h_{ref}))^{5,225}$$

$$p = 1013,25 \cdot (1 - 0,00000226 \cdot (100 - 0))^{5,225} = 1001,34 \text{ mbar}$$

$$T = T_{ref} - 0,0625 \cdot (h - h_{ref})$$

$$T = 18 - 0,0625 \cdot (100 - 0) = 11,75 + 273,16 = 284,75 \text{ K}$$

$$R_h = R_{h0} \cdot e^{-0,000006396 \cdot (h - h_{ref})}$$

$$R_h = 0,5 \cdot e^{-0,0006396 \cdot (100 - 0)} = 1,0453$$

$$e = R_h^{-37,2465 + 0,213166T - 0,000256908T^2}$$

$$e = 1,0453^{-37,2465 + 0,213166 \cdot 284,75 - 0,000256908 \cdot 284,75^2} = 1,12267$$

Ara ja es pot substituir a la fórmula:

$$D_z^{trop} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R$$

$$D_z^{trop} = \frac{0,002277}{\cos 30} \left[1001,34 + \left(\frac{1255}{284,75} + 0,05 \right) 1,12267 - 0 \right] + 0$$

$$D_z^{trop} = 2,64 \text{ m}$$

El resultat d'aplicar aquest model tenint un angle zenital del satèl·lit de 30°, dona un error troposfèric de 2,64 metres. L'error creix al augmentar l'angle zenital d'observació del satèl·lit. Es pot observar en la següent gràfica la variació del retard troposfèric en funció de l'angle zenital del satèl·lit.

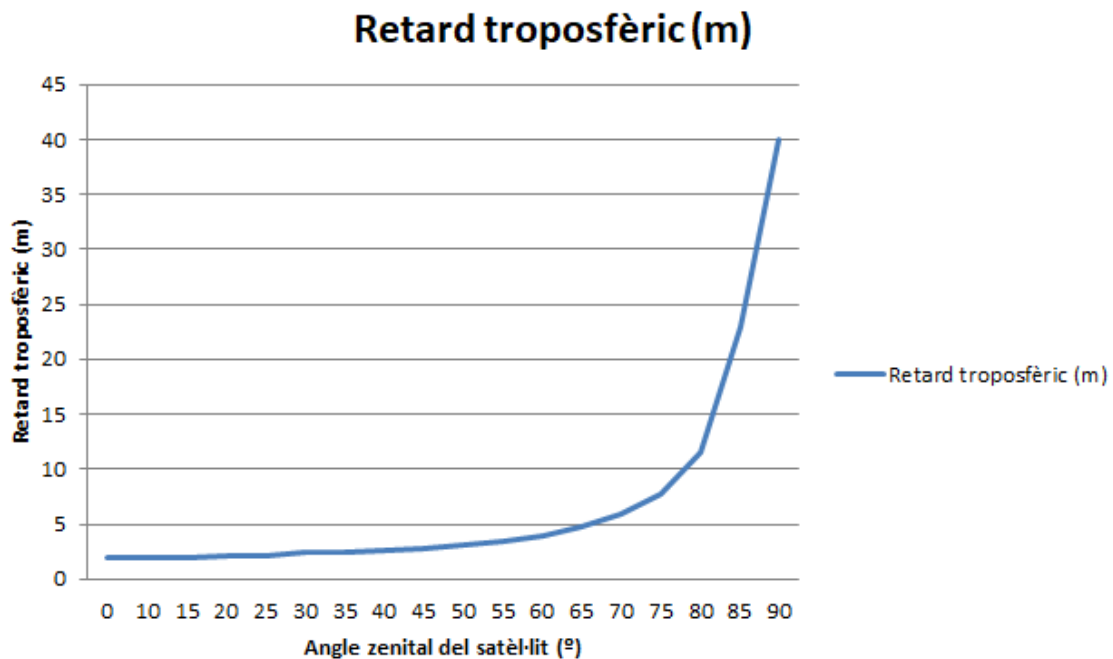


Figura 4.5: Gràfica del retard troposfèric en funció de l'angle zenital del satèl·lit

4.3 Errors degut al multipath

4.3.1 Càlcul d'error per multipath

És l'efecte causat per múltiples reflexions del senyal emesa per el satèl·lit a superfícies properes de l'antena. Aquestes senyals que venen reflectides recorren un camí més llarg i poden arribar a distorsionar l'amplitud i la forma d'ona del senyal. Aquest error es produeix perquè el multipath provoca una

deformació en la funció de correlació, de manera que aquesta es torna asimètrica (**Figura 4.7**), considerant l'ample de banda de tot el senyal, incloent el senyal directe i el multipath.

Cada senyal que rep el receptor té un retard temporal conseqüència del temps que necessita per recórrer el camí cap al receptor. S'ha de tenir en compte que el camí que recorre el senyal directe és el camí més curt entre el satèl·lit i el receptor, i per lo tant, aquesta distància que recorre el senyal directe serà el valor de la pseudo distància.

Tal i com s'ha comentat, el senyal que rep el receptor és la suma de varies rèpliques d'una mateixa senyal, la correlació resultant que farà el receptor serà igual a la suma de diferents pics de correlació. Es pot escriure amb la següent equació:

$$r_{total} = \sum_{m=0}^M a_m \cdot r(t - \tau_m) \quad (4.14)$$

On a_m és l'amplitud de cada senyal rebuda i τ_m és el retard temporal de cada una de les M mostres rebudes per el receptor. A continuació es mostra l'esquema del que seria un escenari amb multipath i a continuació una gràfica de com ens afecta un escenari amb múltiples senyals reflectides.

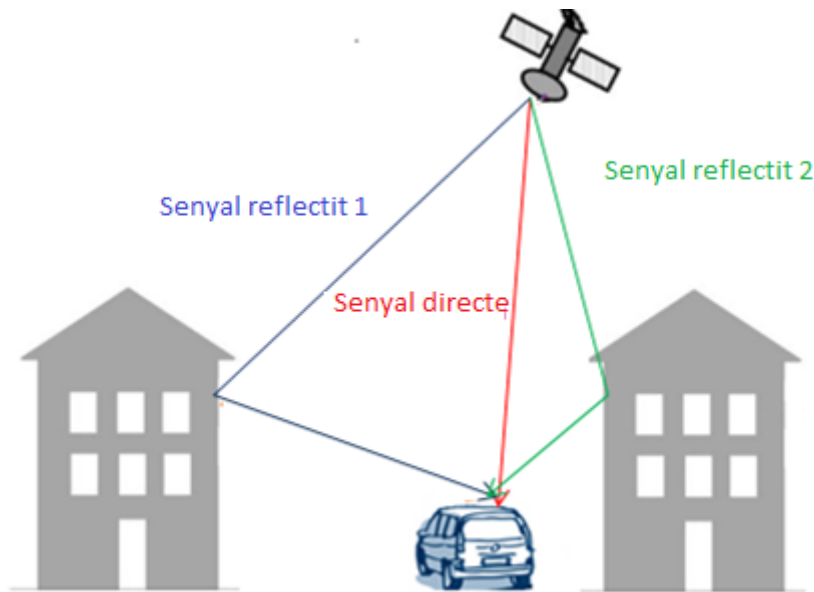


Figura 4.6: Escenari amb multipath

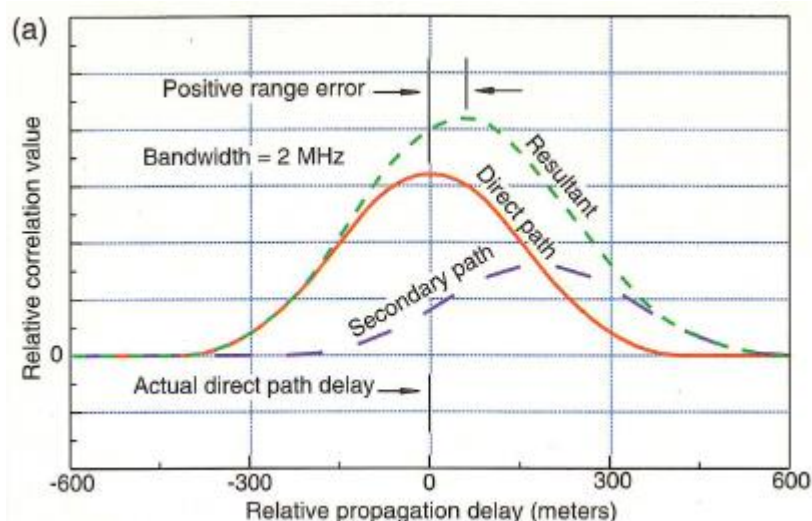


Figura 4.7: Efecte del multipath en la funció de correlació [23]

Com ja s'ha vist anteriorment, per fer el càlcul de la pseudo distància es necessita correlar el senyal que rep el receptor (codi PRN) amb el que genera internament. En la **Figura 4.7** s'observen els pic de correlació dels senyals que rep el receptor. En color vermell s'observa el pic de correlació que obté el receptor al correlar el senyal directe amb la que ell mateix genera mentre que en color blau és el pic de correlació que obté d'una senyal reflectida. Es pot apreciar que el senyal reflectida està desplaçat a la dreta ja que arriba més tard al receptor (retard per multipath).

Si el receptor només rebés el senyal directe, només veuria un pic de correlació i agafaria el desplaçament Δt que ha hagut de fer per obtenir el temps que ha trigat el senyal en arribar al receptor i d'aquesta manera realitzaria el càlcul del pseudo rang (comentat en el capítol 3.3.1.2) i posteriorment calcularem la posició.

Ara bé, en el cas de la **Figura 4.7**, es pot veure que al tenir un senyal reflectida, fa que es distorsioni la forma de correlació i el receptor estarà realitzant un càlcul de la pseudo distància erroni ja que estarà agafant un valor del retard major. Aquest error afecta tant a les pseudo distàncies com a la mesura de fase de portadora però és més significatiu en les mesures de pseudo distàncies per codi C/A.

A continuació s'estudiaran dos escenaris per estudiar l'efecte del multipath en la mesura de la pseudo distància. El primer escenari tindrà un únic senyal reflectida mentre que el segon escenari tindrà tres senyals reflectides

Escenari 1

Es plantejarà el següent escenari: al receptor li arriba un senyal directe del satèl·lit i un senyal reflectida. El satèl·lit està situat a 20200 Km, per tant, el camí directe serà de longitud igual a 20200 Km mentre que el senyal reflectida haurem de calcular la seva distància.

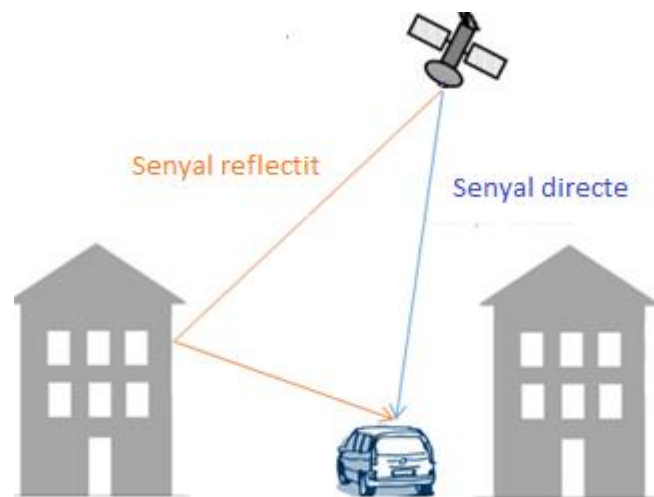


Figura 4.8: Escenari amb una reflexió

L'escenari 1 serà al carrer de Valencia de Barcelona i s'obté l'amplada del carrer aproximat amb *Google Maps*:

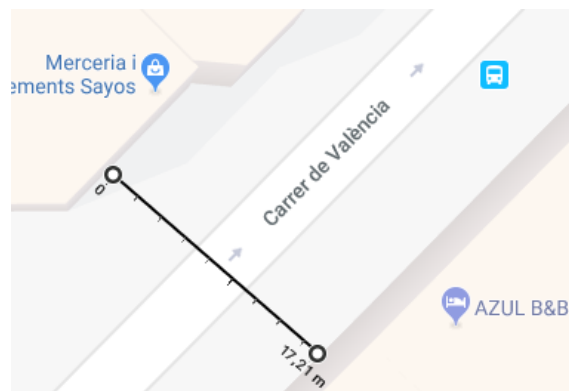


Figura 4.9: Carrer Valencia de Barcelona

L'amplada d'aquest carrer és d'aproximadament uns 17,21 metres. Si es planteja l'escenari de la **Figura 4.8** es suposarà que el senyal és reflectit en l'edifici a una alçada de 15 metres i el cotxe està situat a 14 metres de la paret on el senyal és reflectit. Aplicant el teorema de Pitàgores ens dona que el senyal reflectit des de la paret de l'edifici fins al cotxe fa uns 20 metres.

Per tal de poder calcular la llargada de Z també es farà el càlcul mitjançant el teorema de Pitàgores, per això es traça la distància que hi ha de l'edifici fins a el senyal directe que es prendrà per uns 11 metres. En tots els càlculs que s'han realitzat s'està tenint en compte que l'angle que forma l'eix horitzontal amb el camí directe del senyal procedent del satèl·lit són angles rectes.

Primerament es calcula el valor d'Y que es pot observar en la **Figura 4.10**:

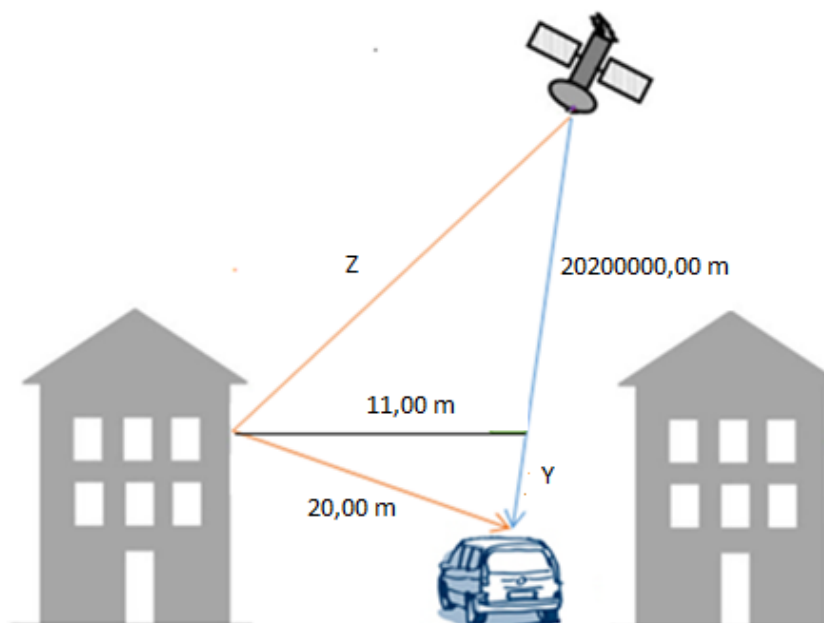


Figura 4.10: Distàncies escenari 1

$$20^2 = 11^2 + Y^2$$

$$Y = \sqrt{20^2 - 11^2} = 16,70 \text{ m}$$

Un cop es té el valor d'Y, es resta a la distància que separa el receptor del satèl·lit (20200,00 Km). D'aquesta manera s'obté un altre triangle rectangle i es podrà tornar a calcular mitjançant el teorema de Pitàgores la distància Z.

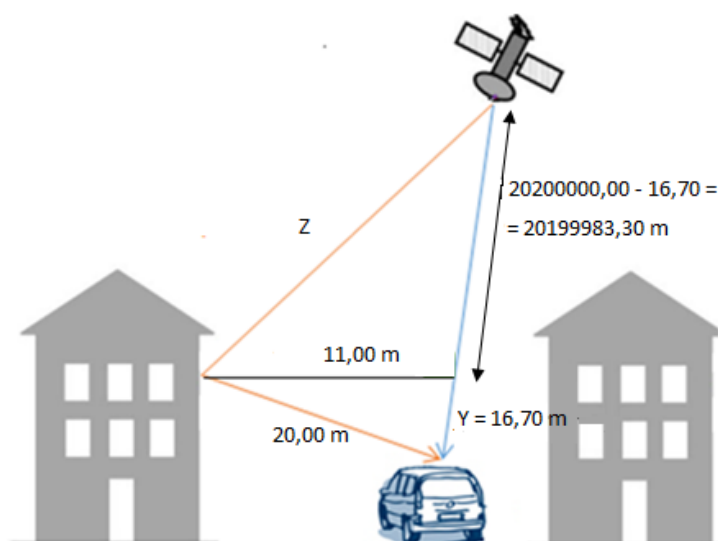


Figura 4.11: Distàncies escenari 1

$$Z^2 = 11,00^2 + 20199983,30^2$$

$$Z = 20199983,30 \text{ m}$$

Ara ja es pot calcular el retard que patirà el senyal degut al multipath, utilitzant la següent formula:

$$\Delta t = \frac{\text{Reflectedpath} - \text{Directpath}}{c} =$$

$$\Delta t = \frac{20199983,30 + 20,00 - 202000000,00}{3 \cdot 10^8} = \frac{3,30}{3 \cdot 10^8} = 11,00 \text{ ns}$$

El que equival a un error en la pseudo distància de:

$$\Delta x = 11,00 \text{ ns} \cdot 3 \cdot 10^8 = 3,30 \text{ m}$$

Escenari 2

Un cop plantejat el primer escenari, on s'ha estudiat el retard que introdueix un senyal reflectit per multipath, ara s'estudiarà un cas més realista. El carrer que s'ha seleccionat és el carrer Villarroel de Barcelona ja que té més amplada que el primer escenari i es vol estudiar més d'una reflexió.

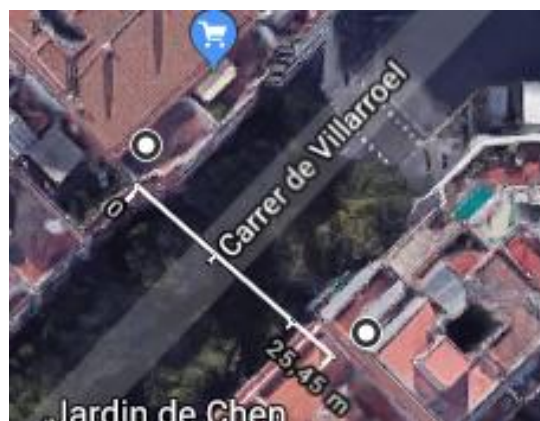


Figura 4.12: Carrer de Villarroel Barcelona

Un receptor pot rebre moltes reflexions provocades per els edificis, arbres i altres elements, però per el càlcul s'ha simplificat l'escenari per poder estudiar l'efecte del multipath en el cas de tenir tres reflexions i un senyal directe

S'analitzarà el retard que introdueix cada reflexió del senyal i finalment es farà un càlcul del valor quadràtic mitjà (RMS). L'escenari plantejat és el següent:

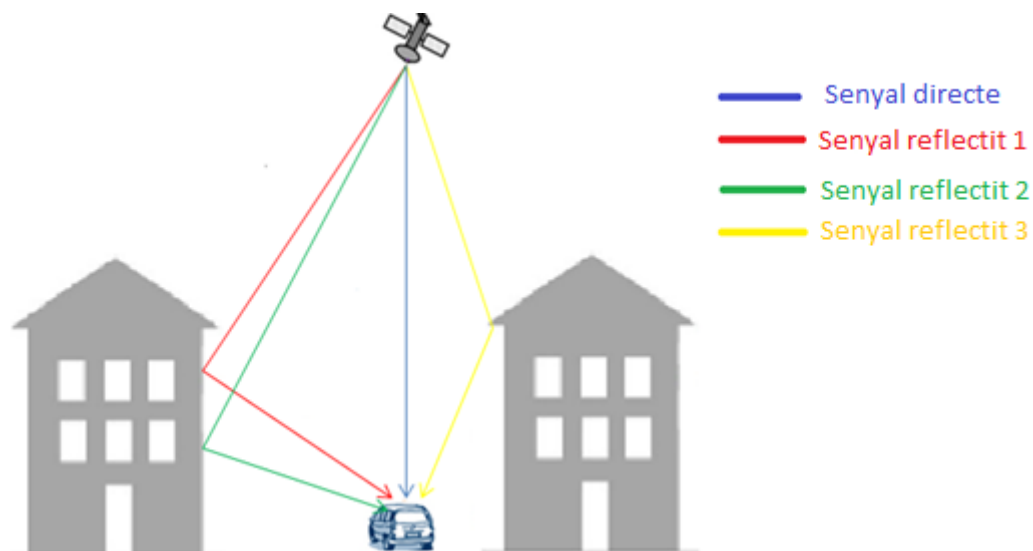


Figura 4.13: Escenari amb tres reflexions

Senyal reflectit 1

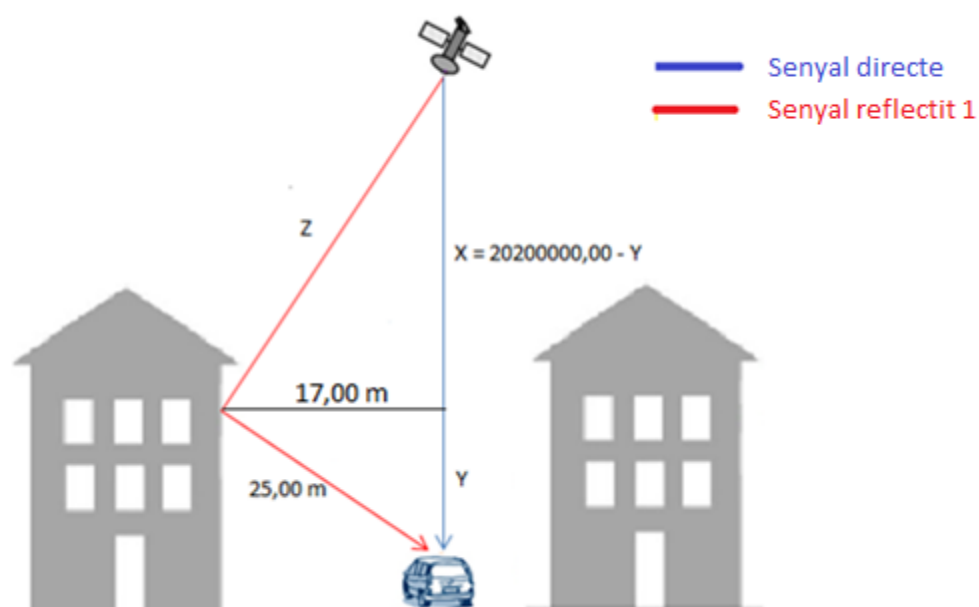


Figura 4.14: Càlcul primera reflexió

$$25,00^2 = 10,00^2 + Y^2$$

$$Y = \sqrt{25,00^2 - 17,00^2} = 18,33 \text{ m}$$

Per lo tant:

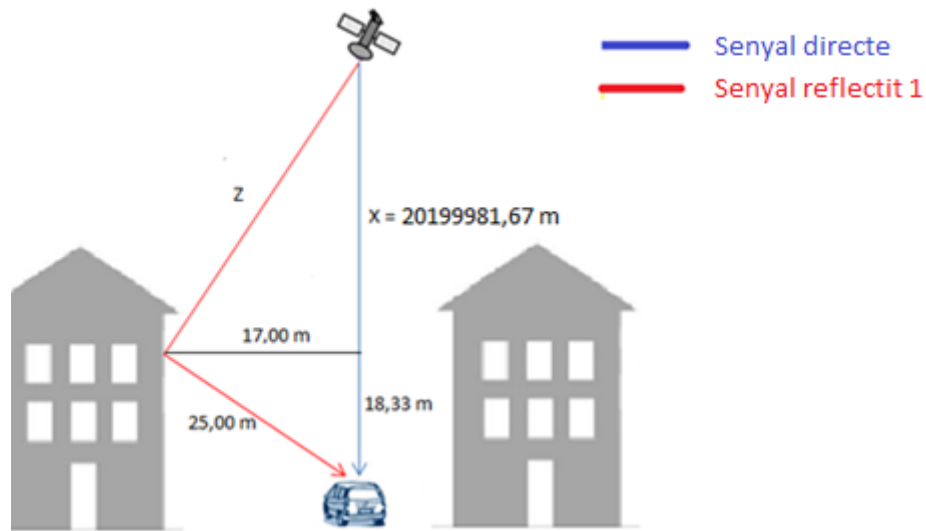


Figura 4.15: Càlcul primera reflexió

Ara es calcularà el valor de Z mitjançant Pitàgores:

$$Z^2 = 17,00^2 + 20199981,67^2$$

$$Z = 20199981,67 \text{ m}$$

Per tant ara es pot calcular el retard que introdueix aquesta reflexió:

$$\Delta t = \frac{\text{Reflectedpath} - \text{Directpath}}{c} = \frac{20199981,67 + 25,00 - 20200000,00}{3 \cdot 10^8} =$$

$$\Delta t_3 = 22,23 \text{ ns}$$

Si es multiplica per la velocitat de la llum s'obindrà l'error que introdueix en el càlcul de la pseudo distància:

$$\Delta x_3 = 6,67 \text{ m}$$

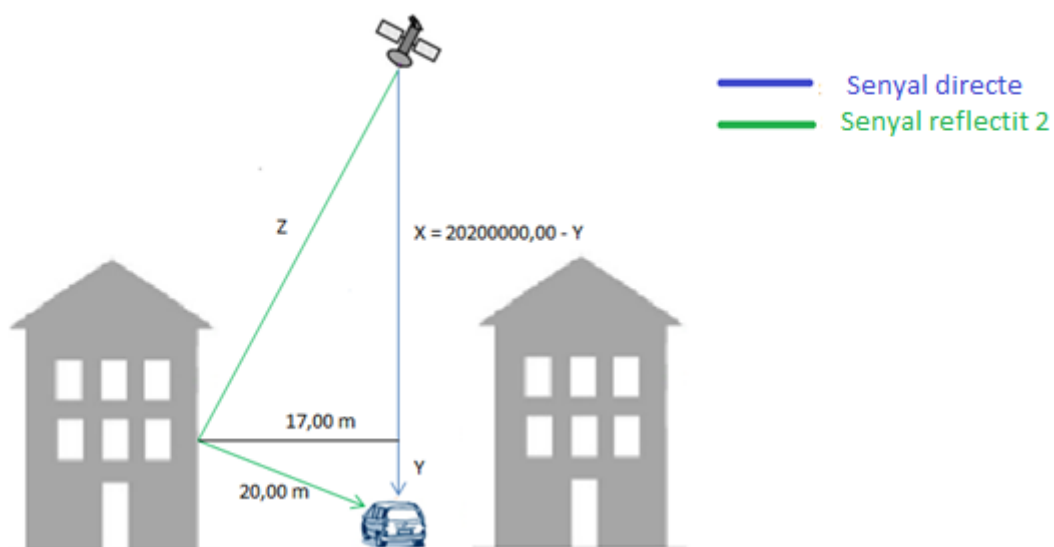
Senyal reflectit 2

Figura 4.16: Càlcul segona reflexió

$$20,00^2 = 15,00^2 + Y^2$$

$$Y = \sqrt{20,00^2 - 15,00^2} = 13,23 \text{ m}$$

Per tant:

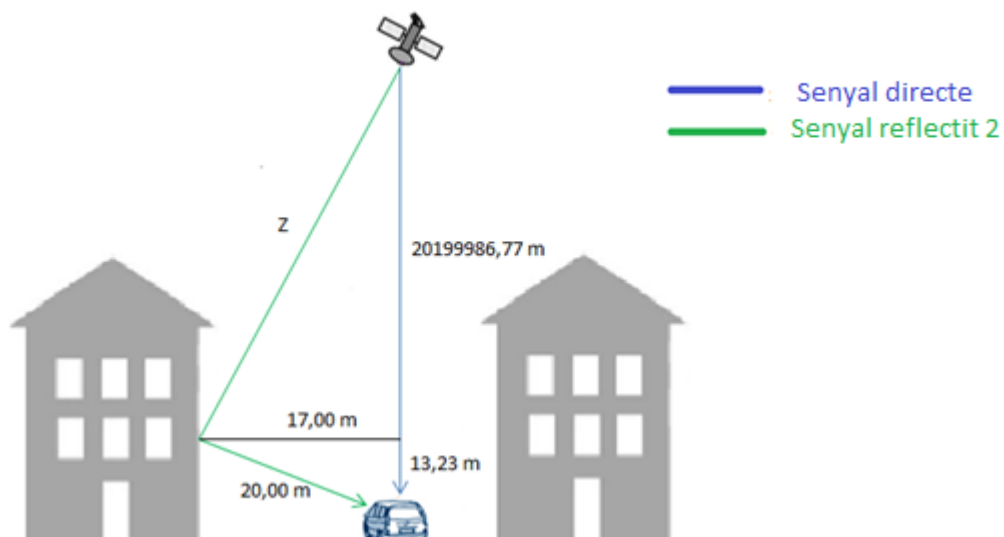


Figura 4.17: Càlcul segona reflexió

Ara es calcularà el valor de Z mitjançant Pitàgores:

$$Z^2 = 17,00^2 + 20199986,77^2$$

$$Z = 20199986,77$$

Per tant ara es pot calcular el retard que introdueix aquesta reflexió:

$$\Delta t = \frac{\text{Reflectedpath} - \text{Directpath}}{c} = \frac{201999986,77 + 20,00 - 20200000,00}{3 \cdot 10^8} =$$

$$\Delta t_3 = 22,56 \text{ ns}$$

Si es multiplica per la velocitat de la llum s'obté l'error que introdueix en el càlcul de la pseudo distància:

$$\Delta x_3 = 6,77 \text{ m}$$

Senyal reflectit 3

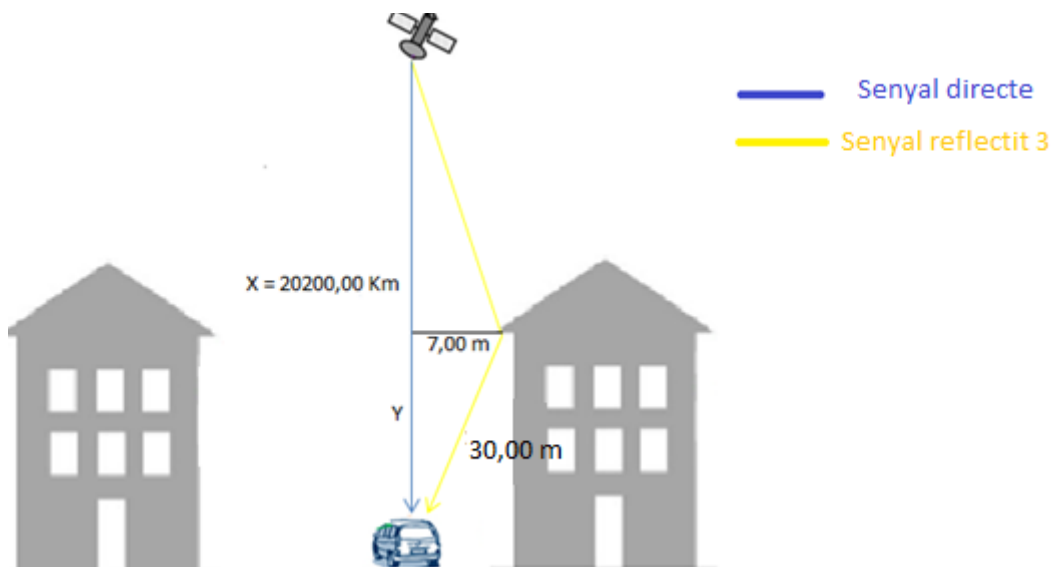


Figura 4.18: Càlcul tercera reflexió

$$30,00^2 = 7,00^2 + Y^2$$

$$Y = \sqrt{30,00^2 - 7,00^2} = 29,17 \text{ m}$$

Per tant:

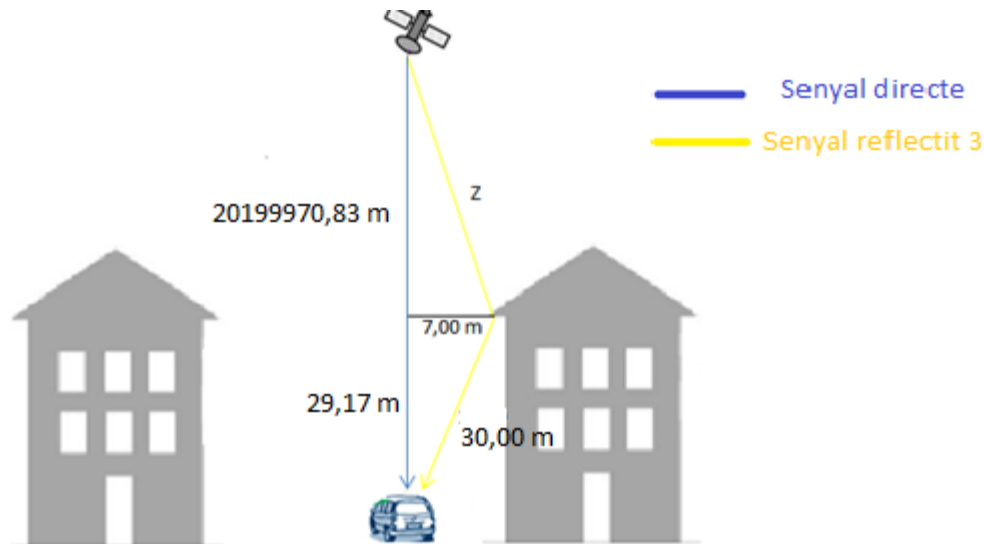


Figura 4.19: Càlcul tercera reflexió

Ara es calcularà el valor de Z mitjançant Pitàgores:

$$Z^2 = 7,00^2 + 20199970,83^2$$

$$Z = 20199970,83$$

Per tant ara es pot calcular el retard que introdueix aquesta reflexió:

$$\Delta t = \frac{\text{Reflectedpath} - \text{Directpath}}{c} = \frac{20199970,83 + 30 - 20200000,00}{3 \cdot 10^8} =$$

$$\Delta t_3 = 2,77 \text{ ns}$$

Si es multiplica per la velocitat de la llum s'obté l'error que introdueix el multipath en el càlcul de la pseudo distància:

$$\Delta x_3 = 0,83 \text{ m}$$

Un cop s'han calculat els errors que introdueix el multipath, es calcularà l'error quadràtic mitjà (RMS⁸) considerant els tres retards que ens intrueix l'escenari:

$$\text{Retard multipath (RMS)} = \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2 + \Delta t_3^2}{3}} =$$

⁸ RMS (Root Mean Squared): és una mesura estadística de la magnitud d'una quantitat variable.

$$= \sqrt{\frac{(22,23 \text{ ns})^2 + (22,56 \text{ ns})^2 + (2,77 \text{ ns})^2}{3}} = 18,36 \text{ ns}$$

Si es multiplica per la velocitat de la llum s'obté un error en la pseudo distància de:

$$\text{Error multipath} = 5,50 \text{ m}$$

4.3.2 Simulació de l'error per multipath amb REMCOM

Un cop realitzat un càlcul teòric del retard que ens pot introduir un escenari amb multipath, es realitzarà un estudi d'un escenari real amb un software anomenat *REMCOM* (Annex D). L'objectiu de fer aquestes simulacions és la de veure l'efecte del multipath en un escenari real quantificant el retard del senyal dividint-lo en dos casos: el primer cas fent servir una antena receptora senzilla on el diagrama de radiació fos omnidireccional i en el segon cas fent servir una antena receptora més sofisticada sense lòbuls secundaris ja que d'aquesta manera hauria de mitigar l'efecte del multipath.

Fent servir aquest programa s'ha pogut dissenyar un escenari real amb un cotxe que segueix una certa trajectòria i veure com afecten les reflexions provocades per els edificis al senyal GPS que rep el cotxe. Per fer-ho, s'ha hagut de fer el disseny de l'entorn:

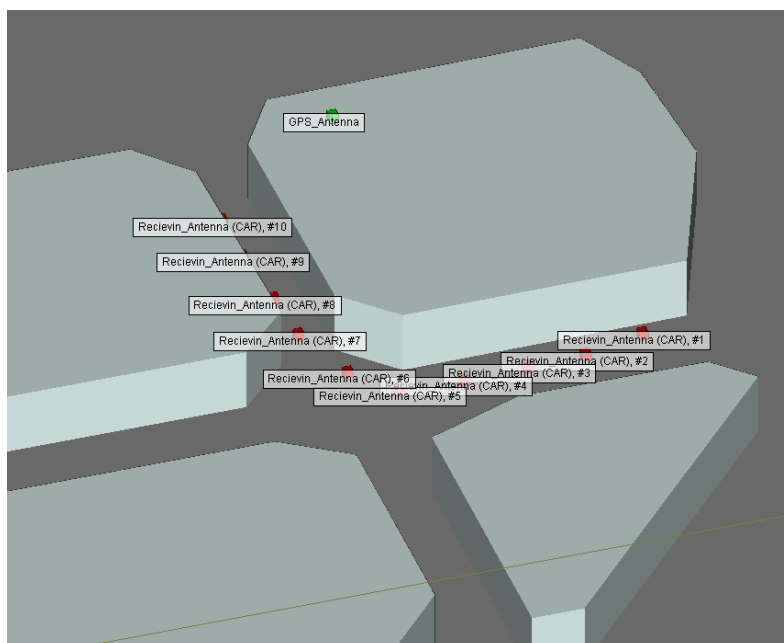


Figura 4.20: Escenari utilitzat amb REMCOM

Per fer el disseny es va col·locar l'antena transmissora, tractant de simular un satèl·lit, a una alçada de $Z=100$ metres. El programa et permet col·locar-la a

major alçada però no és possible fer la simulació a una alçada real que seria $Z=20200$ Km ja que el cost computacional era molt alt i per fer les simulacions que es volien fer ja ens servia l'alçada de 100 metres.

Es va indicar que el cotxe es desplaçés d'un carrer a un altre, fent un gir, i aquest desplaçament es va dividir en 10 punts per fer l'estudi tal i es pot observar en la **Figura 4.20**. El primer cas d'aquest estudi es va fer servir una antena receptora simple que estava per defecte en el programa, una *half-wave dipole* d'aquesta manera el receptor rebria tots els senyals que li arribin tant el senyal directe com els multipath. Un cop dissenyat l'escenari, es col·loca el transmissor on es vulgui i s'inicia la simulació.

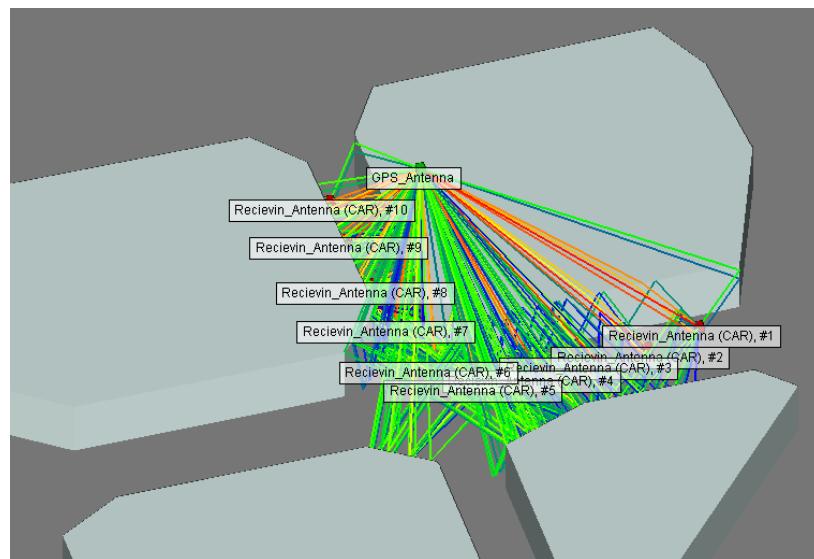


Figura 4.21: Senyals reflectides en el nostre escenari

Es pot observar en la **Figura 4.21** com el satèl·lit transmet els senyals i com són reflectits per els edificis fins acabar arribant al nostre receptor. Aquest software és capaç de proporcionar, entre altres valors, la potència rebuda, la SNR ⁹ i el *Delay Spread*. El *Delay Spread* es pot definir com la diferència entre el temps d'arribada de la reflexió més retardada i el temps d'arribada del senyal directe i és justament s'ha calculat en l'apartat del càlcul teòric.

⁹ SNR : Signal-to-Noise Ratio és la proporció que hi ha entre el senyal que es transmet i la potència del soroll que pateix.

```
#Rx
# X(m), Y(m), Z(m), Distance(m), DelaySpread(sec)
1 19.5035 97.5177 2 134.57 2.60158e-09
2 24.2317 79.7872 2 122.869 3.02927e-09
3 24.8227 63.2388 2 113.661 3.60085e-09
4 25.4137 44.9173 2 105.584 4.85663e-09
5 24.2317 26.5957 2 100.334 1.03628e-08
6 12.4113 15.9574 2 100.097 1.3714e-08
7 -8.86525 8.86525 2 105.519 4.94719e-09
8 -27.1868 7.68321 2 113.55 4.02809e-09
9 -49.0544 5.91017 2 126 3.05819e-09
10 -66.7849 5.91017 2 137.836 2.56227e-09
```

Figura 4.22: Valors de Delay Spread a cada punt

Aquest seria el resultat de fer la simulació i demanar-li a REMCOM el valor de *Delay Spread*. Com a resultat dona un arxiu .txt on apareix el *Delay Spread* de cada punt de la trajectòria del cotxe, així doncs, com es van indicar 10 punts ens ha donat 10 valors.

Si s'analitzen els resultats obtinguts, es pot observar com en el punt 5 s'obté un valor de *Delay Spread* de $1,036 \cdot 10^{-8}$ s que seria el punt on més afectaria el multipath ja que dona el valor més gran. Això vol dir que la diferència entre el retard del senyal reflectit amb més retard i el senyal directe és major i això es tradueix en un error més gran. A més, es pot dir que el en el punt 7 seria el punt on menys ens afecta el multipath ja que el valor del *Delay Spread* és més petit.

Si es multiplica el valor del retard màxim que s'ha obtingut que seria $1,036 \cdot 10^{-8}$ s per la velocitat de la llum s'obté un error en la pseudo distància de 3,11 m.

REMCOM també dona informació més detallada de cada punt on s'ha definit el receptor.

Rx point's path properties

Receiver:	Recievin_Antenna (CAR), Point #1
Number of paths:	25 from GPS_Antenna, Point #1
Total received power (dBm):	-86.03
Minimum received power path (dBm):	-172.78
Maximum received power path (dBm):	-83.43
Mean time of arrival (s):	4.497620e-07
Shortest time of arrival (s):	4.490230e-07
Longest time of arrival (s):	1.046720e-06
Delay Spread (s):	2.601580e-09

OK

Figura 4.23: Resultats en el punt 1

Es pot observar els diferents valors que dona el software entre ells la potència rebuda, el nombre de reflexions que rep el receptor i el Delay Spread en aquell

punt. Comparant amb l'arxiu .txt que s'ha analitzat anteriorment ens dona exactament el valor de $2,6010^{-9}$ s en el punt 1.

Al fer servir una antena *half-wave dipole* el receptor no només estarà agafant el senyal directe sinó que també agafarà els senyals reflectits. El següent objectiu d'aquestes simulacions és fer servir una antena més directiva i sense lòbuls secundaris, d'aquesta manera s'aconsegueix que l'antena receptora només rebi el senyal directe i no pas les reflexions provocades per el multipath i un cop es realitzi la simulació fer una comparativa del *Delay Spread* abans i després d'implementar una antena més sofisticada.

Per tal de dur a terme aquesta nova simulació, s'havia de tenir clar quin tipus d'antena serviria per complir amb les especificacions que s'han comentat. Una antena que no tingui lòbuls secundaris pot ser una *Antena Binomial*¹⁰. Aquesta antena té una distribució de corrent binomial i per poder dissenyar-la es va haver de calcular el nombre de coeficients del polinomi [33]:

$$P(z) = (z + 1)^{N-1} \quad (4.15)$$

$$a_n = \binom{N-1}{n} = \frac{(N-1)!}{n!(N-1-n)!} \quad (4.16)$$

L'antena es va dissenyar fent servir un ¹¹antena patch d'array 4x4 amb una distribució binomial mitjançant el software *FEKO* i el treball realitzat a [36]. Un cop es va fer el disseny de l'antena es va obtenir diagrama de radiació més directiu i amb pocs lòbuls secundaris que era l'objectiu del disseny.

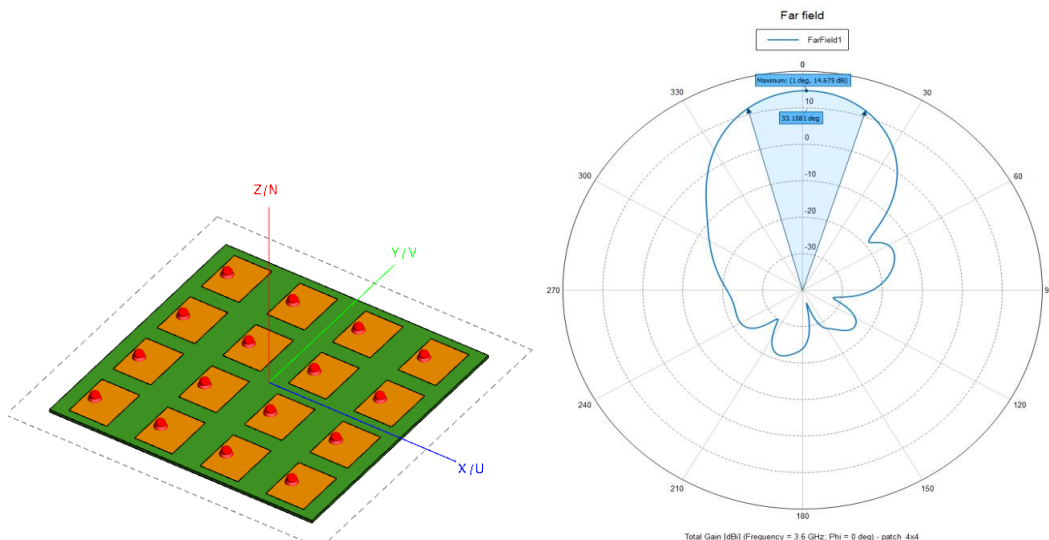


Figura 4.24: Esquerra: patch 4x4 utilitzat. Dreta: diagrama de radiació de l'antena

¹⁰ Antena Binomial: tipus d'array que té una distribució de corrent binomial en els seus elements i aquesta distribució la defineix els coeficients de la serie binomial.

¹¹ Patch antena: tipus d'antena procedent de tecnologia microstrip. Tenen una estructura plana i de baix pes.

Un cop dissenyada l'antena es va importar a REMCOM per fer-la servir en el receptor de la nostra simulació. L'objectiu es veure com, utilitzant una antena més sofisticada amb menys lòbuls secundaris, mitiguem el retard per multipath. Es va fer la simulació i es va observar els resultats de *Delay Spread* obtinguts amb aquesta nova antena.

```
#Rx
# X(m), Y(m), Z(m), Distance(m), DelaySpread(sec)
1 19.5035 97.5177 2 134.57 2.15715e-09
2 24.2317 79.7872 2 122.869 1.7988e-09
3 24.8227 63.2388 2 113.661 1.37347e-09
4 25.4137 44.9173 2 105.584 1.27939e-09
5 24.2317 26.5957 2 100.334 6.00859e-10
6 12.4113 15.9574 2 100.097 5.57621e-10
7 -8.86525 8.86525 2 105.519 5.52895e-10
8 -27.1868 7.68321 2 113.55 7.14272e-10
9 -49.0544 5.91017 2 126 8.97249e-10
10 -66.7849 5.91017 2 137.836 1.18745e-09
```

Figura 4.25: Delay Spread fent servir antena millorada

Un cop s'han obtingut els resultats de la simulació, es pot fer un gràfic comparant els valors de *Delay Spread* fent servir una antena senzilla i l'antena dissenyada.

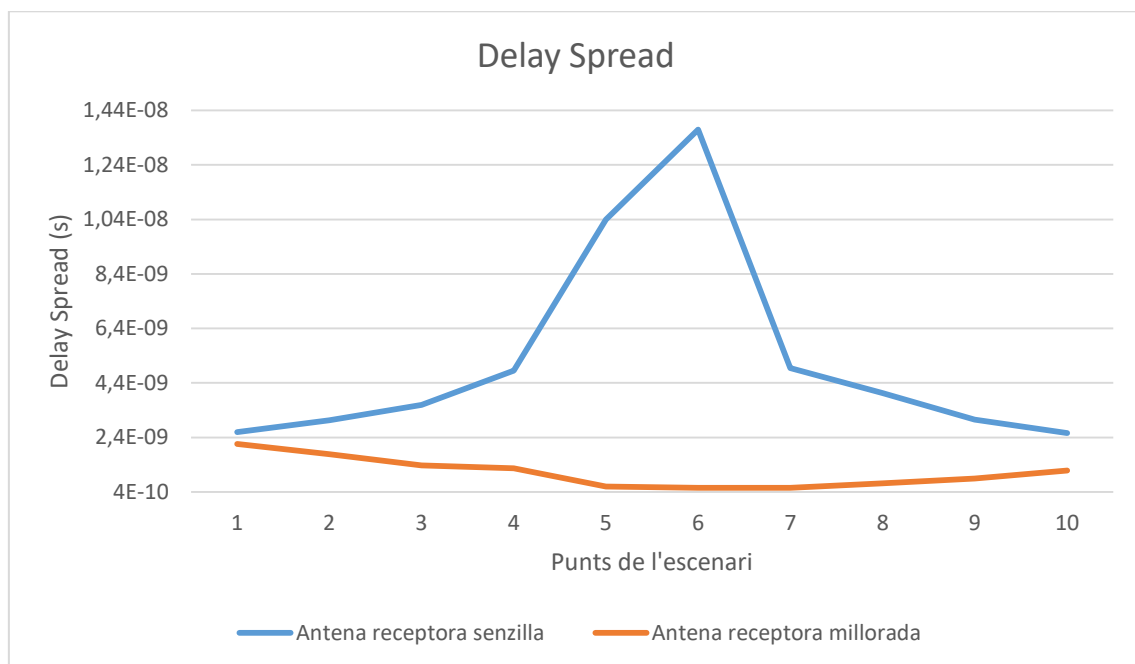


Figura 4.26: Gràfic comparatiu del Delay Spread fent servir les dues antenes

Es pot observar com en el primer punt, s'obté un valor de *Delay Spread* molt similar ja que és un punt on hi ha menys reflexions. La millora en el *Delay Spread* s'observa a mesura que el cotxe es va desplaçant per els punts ja que en els altres punts trobem més reflexions. S'ha passat de tenir en el punt 6 un màxim de *Delay Spread* de $1,38 \cdot 10^{-8}$ s a $5,57 \cdot 10^{-10}$ s el que significa una

millora significativa en termes de retard ja que l'antena millorada és capaç de mitigar l'efecte multipath.

Amb l'antena senzilla s'ha obtingut un valor de *Delay Spread* en el punt 6 de: $1,38 \cdot 10^{-8}$ això es tradueix en un error en metres de:

$$1,38 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^8 = 4,14 \text{ m}$$

En canvi, gràcies a la antena millorada, s'ha reduït l'error en metres considerablement:

$$5,57 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^8 = 0,17 \text{ m}$$

Amb la utilització d'una antena més sofisticada s'ha aconseguit reduir en un factor 15, l'error en la pseudo distància provocat per el multipath.

4.4 Errors en el receptor

4.4.1 Error del rellotge del receptor

Els receptors GPS, a diferència dels satèl·lits, no tenen rellotges atòmics sinó que utilitzen rellotges de cristall, que tenen menors precisions en comparació amb els rellotges atòmics (menor estabilitat).

En l'instant en el que el receptor rep el senyal procedent del satèl·lit, el seu rellotge intern tindrà un desfasament respecte l'escala de temps. Per tal d'eliminar l'error que hi ha serà gràcies a la utilització d'un quart satèl·lit per tal de resoldre el desfasament dels rellotges.

4.4.2 Soroll en el receptor

Qualsevol mesura electrònica pot patir un error de mesura aleatori (o soroll) provocat per la electrònica del receptor. Afecta a la correlació de codis i a la mesura de diferència de fase. Generalment, l'error per el soroll en el receptor és sobre l'1% de la longitud d'ona del senyal, és a dir, en el cas de mesures de codi C/A pot arribar a ser un error d'aproximadament 3 metres mentre que en el cas del codi P és de 3 cm. La contribució d'aquest error en la mesura de la pseudo distància sol ser d'aproximadament 0,6 metres, en cas d'estar utilitzant mesures de codi C/A.

A continuació es mostra una taula resum on apareixen els errors calculats que contribueixen en el càlcul de la pseudo distància:

Taula 4.2: Fonts d'error quantificades

Element	Font d'error	Error (m)
Satèl·lit	Error del rellotge	1,00
	Error en els paràmetres orbitals (efemèrides transmeses)	2,50
	S/A: Disponibilitat Selectiva	0,00
Propagació del senyal	Error ionosfèric	4,84
	Error troposfèric	2,64
	Multipath	3,00
Receptor	Error instrumental	0,60

User Equivalent Range Error

Un cop calculats tots els errors que pateix el senyal GPS fins arribar al receptor, és necessari definir un paràmetre que quantifica l'efecte de tots aquests errors, és l'anomenat *User Equivalent Range Error (UERE)*. Es defineix com un error *RMS* i s'assumirà que els errors que pateixen els senyals de tots els satèl·lits són idèntics i independents:

$$UERE = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4.16)$$

$$UERE = \sqrt{1,00^2 + 2,50^2 + 4,84^2 + 2,64^2 + 3,00^2 + 0,60^2} = 6,86 \text{ m}$$

El paràmetre calculat UERE no és l'error en la posició calculada per el receptor sinó que és l'error en la pseudo distància del receptor a un dels satèl·lits. Per poder determinar l'error en la posició s'ha de tenir en compte com estan posicionats els satèl·lits respecte el receptor.

La contribució de la geometria dels satèl·lits als errors en la posició calculada per el receptor s'anomena *Dilution of Precision*¹² (DOP). Aquest paràmetre s'ha de multiplicar per el valor obtingut de la UERE. Generalment, com més espaiats es trobin els satèl·lits, menor errors s'obtindran en la posició.

Si es multiplica l'UERE per el DOP s'obté la incertesa en la posició horitzontal fent servir el valor de HDOP¹³ i la incertesa en la posició vertical fent servir el valor de VDOP¹⁴. En el nostre càlcul, suposarem que els dos paràmetres tenen un valor de 1,50.

Taula 4.3: Fonts d'error quantificades

Element	Font d'error	Error (m)
Satèl·lit	Error del rellotge	1,00
	Error en els paràmetres orbitals (efemèrides transmeses)	2,50
	S/A: Disponibilitat Selectiva	0,00
Propagació del senyal	Error ionosfèric	4,84
	Error troposfèric	2,64
	Multipath	3,00
Receptor	Error del rellotge	0,00
	Error instrumental	0,60
User Equivalent Range Error, rms	6,86 m	
Vertical position error (1σ) Amb VDOP = 1,50	$1,00 \cdot 1,50 \cdot 6,86 = 10,29$ m	
Horizontal position error (1σ) Amb HDOP = 1,50	$1,00 \cdot 1,50 \cdot 6,86 = 10,29$ m	

¹² Dilution Of Precision: descripció de l'efecte de la geometria dels satèl·lits en el càlculs de la posició. Un valor petit vol dir que els satèl·lits estan ben separats.

¹³ HDOP: valor del DOP que fa referència a les mesures horitzontals.

¹⁴ VDOP: valor del DOP que fa referència a les mesures verticals.

El valor obtingut de l'exactitud en la posició horitzontal és de 10,29 m en el cas de 1σ , és a dir, que el 68% del temps s'obtidran valors iguals o menors a 10,29 m. En canvi, si el que es vol és calcular l'exactitud en la posició horitzontal el 95% del temps (2σ) només caldrà multiplicar per 2 el valor anterior:

$$2,00 \cdot 1,50 \cdot 6,86 = 20,58 \text{ m}$$

Aquest resultat vol dir que en el 95% del temps, s'obtidran valors en la posició horitzontal iguals o menors dels 20,58 m. És un valor elevat però s'ha de tenir en compte que s'han fet servir els valors teòrics, sense aplicar cap tipus de correcció.

A la web de gps.gov [18] hi ha disponible un informe on mostren el funcionament del GPS Standard Positioning Service (SPS) durant el període de l'1 d'Octubre i el 31 de Desembre de l'any 2016. Les dades que han extret provenen de 28 estacions WAAS¹⁵ ubicades als Estats Units. En la **Figura 4.27** extreta d'aquest informe, es pot observar la mitjana, de les 28 estacions WAAS (d'Albuquerque fins a Whashington, DC), de l'error en la posició horitzontal en metres (95% - 2σ).

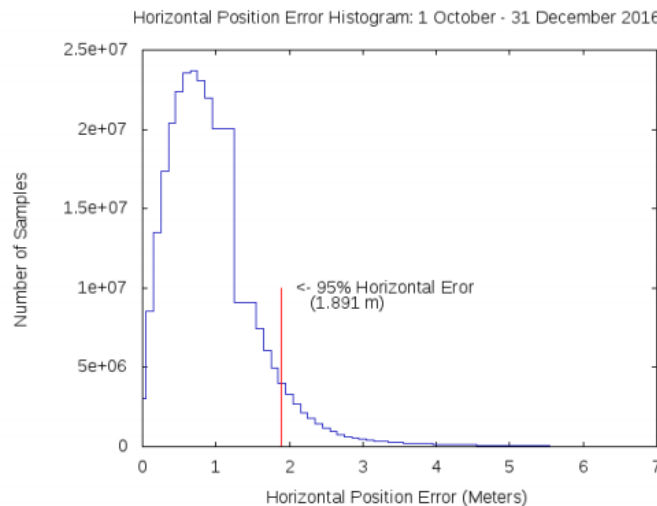


Figura 4.27: Horizontal Position Error (95%) del GPS de l'1 d'octubre al 31 de desembre de l'any 2016 [18]

Observant la **Figura 4.27** les dades recollides per les estacions WAAS de mitjana indiquen que hi ha un 95% de probabilitat de que l'error horitzontal en metres que s'obté amb el GPS convencional sigui igual o menor a 1,891m. En el nostre càlcul l'error ens dona bastant més gran (20,58 m) perquè no s'han aplicat cap tipus de correccions ionosfèrica ni troposfèrica ja que tots els càlculs han sigut teòrics, en canvi en aquest informe ens dona el resultat amb les correccions aplicades. A més, cal tenir en compte que les estacions WAAS estan ubicades en llocs on no tenen cap tipus d'error provocat per multipath ja que només reben el senyal directe.

¹⁵ WAAS: estacions de referencia ubicades en punts estratègics.

5. TÈCNiques DE REDUCCIÓ DELS ERRORS DE POSICIONAMENT

Tal i com s'ha vist en l'anterior capítol, existeixen diverses fonts d'error que empitjoren l'exactitud de les mesures d'un receptor GNSS. Per tal de calcular la posició es pot fer de dues maneres: posició puntual o posició relativa.

El mètode de posició puntual és el que s'ha estat parlant fins ara, en la qual s'utilitza un sol receptor GPS que mesura els pseudo rangs amb els quatre satèl·lits per determinar la seva posició.

El mètode GPS de posició relativa, en canvi, utilitza simultàniament dos receptors rebent senyals dels mateixos satèl·lits. Si els dos receptors reben els senyals dels quatre mateixos satèl·lits, s'obtindrà una exactitud en el posicionament de pocs metres o de centímetres segons la tècnica que s'utilitzi. En aquest mètode es pot utilitzar mesures de codi o de fase, depenent les exactituds que es vulguin obtenir.

5.1 Tècniques diferencials

5.1.1 Differential GPS (DGPS)

El DGPS és una tècnica de posicionament relatiu basada en codi. Aquesta tècnica consisteix en utilitzar una estació base per corregir els errors que pateixen els receptors GPS que estiguin a prop seu. El DGPS es basa en que els errors que pateix el senyal GPS en la mesura dels pseudo rang són iguals per l'estació base i el receptor (rover¹⁶). Cada receptor fa servir els senyals que reben dels satèl·lits per poder calcular la seva posició però aquests senyals, com ja em estudiat, pateixen un cert retard durant la seva propagació per la atmosfera.

Si els dos receptors es troben propers entre ells (fins a 100 Km), podem dir que els senyals que reben estaran viatjant virtualment per la mateixa atmosfera i per tant tindran virtualment els mateixos errors. Llavors, l'estació base s'encarrega de mesurar el retard que pateix el seu senyal i proporcionar les correccions als altres receptors que estiguin al seu voltant.

L'estació base coneix les seves coordenades ($x_{real}, y_{real}, z_{real}$) ja que es troba en un lloc estàtic i sense edificis ni objectes que puguin afectar al retard del senyal per multipath. Al conèixer la seva posició, calcula el retard que hauria de tenir el senyal GPS per tal d'obtenir exactament la posició en la que es troba i calcula el retard real que pateix el senyal GPS mitjançant el senyal GPS que

¹⁶ Rover: receptor en moviment que aplica les correccions enviades per la estació base

rep i calcula posició a partir d'aquest senyal retardat ($x_{calculada}$, $y_{calculada}$, $z_{calculada}$). La diferència entre els dos retards s'anomena *factor de correcció d'error*. L'estació base transmet aquest factor de correcció als receptors que es troben al seu voltant mitjançant un transmissor radio, que estableix un enllaç de dades unidireccional, per que aquests l'apliquin per corregir els errors que pateixen els senyals GPS.

L'exactitud que s'obté mitjançant aquest mètode és, en el millor cas, per sota del metre, però per obtenir aquest valor el receptor haurà d'estar bastant proper de l'estació base ja que a mesura que el receptor s'allunya de la estació base, l'exactitud serà menor.

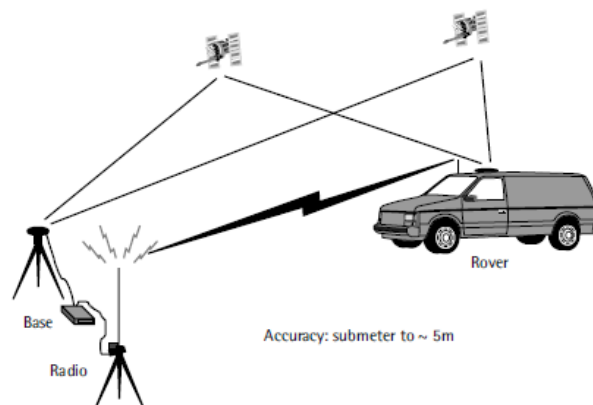


Figura 5.1: Diagrama del funcionament del DGPS

5.1.2 Real-Time Kinematic (RTK)

El RTK és una tècnica d'alta exactitud de posicionament relatiu basat en mesurar la fase de la portadora en comptes de mesurar el codi en el cas del DGPS. Les mesures de fase són molt més exactes (decímetres), però contenen una constant d'inicialització anomenada: ambigüitat de fase. Per tal de fer servir aquesta tècnica i obtenir exactituds de decímetres és necessari resoldre aquesta ambigüitat.

L'estació base reenvia als receptors que te al voltant les mesures de fase de la portadora que realitza i els receptors comparen les seves pròpies mesures de fase amb les mesures que ha fet l'estació base. La distància entre l'estació base i els receptors no ha de ser superior als 15 Km ja que sinó les correccions que realitza l'estació base no seran vàlides. L'exactitud que s'obté amb aquest mètode és de pocs centímetres.

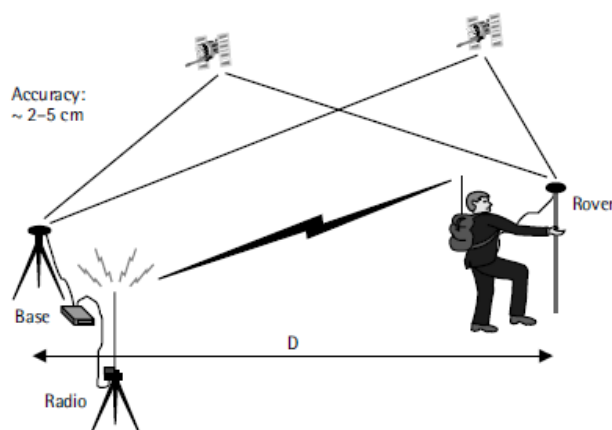


Figura 5.2: Diagrama del funcionament del RTK

5.2 Doble freqüència i multi-constel·lació

És possible obtenir major exactituds en la posició fent servir receptors capaços de processar senyals procedents de diferents constel·lacions de satèl·lits alhora i receptors que rebin senyals de dues freqüències diferents. D'aquestes dues maneres es pot obtenir millors resultats no només en el posicionament sinó en altres factors significatius.

Si s'utilitza un receptor capaç de rebre senyals de diferents constel·lacions, com poden ser per exemple GPS, GLONASS o Galileo, el que s'aconsegueix és augmentar el nombre de satèl·lits visibles per el receptor i això proporciona diferents avantatges. El primer és la reducció del temps d'adquisició del senyal, ja que el receptor sempre tindrà, com a mínim, 4 satèl·lits visibles i no tindrà problemes per poder adquirir els senyals.

Al tenir la possibilitat de fer servir diferents satèl·lits es pot traduir en una millora de la distribució espacial dels satèl·lits visibles fet que es tradueix en un millor DOP. A més, si el senyal d'un satèl·lit està sent bloquejat per un edifici o arriba amb molt de retard provocat per multipath, el receptor podrà adquirir un senyal d'un altre satèl·lit i d'aquesta manera evitar possibles errors.

En cas de que un receptor estigui en un entorn amb multipath, si el receptor és capaç d'utilitzar senyals de diferents constel·lacions el que estarà fent és augmentar la continuïtat del servei i millorant l'exactitud comparant amb la que obtindria en cas d'utilitzar una única constel·lació ja que si el senyal d'un satèl·lit la rep amb molt retard degut al multipath, si utilitzés el senyal d'una altre constel·lació que la rebria de manera directa, augmentaria l'exactitud en la mesura.

El retard ionosfèric varia amb la freqüència per tant afecta de manera diferent a senyals GNSS diferents. Si comparem els retards de dos senyals GNSS diferents, com per exemple L1 i L2, el receptor pot corregir el retard que

introdueix la ionosfera ja que es podrà obtenir un retard diferencial entre les dues senyals i fent aquest retard deduïble.

$$L_3 = \frac{f_1^2 \cdot L_1 - f_2^2 \cdot L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5.1)$$

A més, un receptor que utilitzi multi freqüència es veurà menys afectat per possibles interferències que un receptor d'una freqüència. Si hi hagués interferència en la banda L1, el receptor podrà utilitzar la banda L2 per mantenir una bona exactitud en el posicionament.

5.3 Satellite-Based Augmentation System (SBAS)

S'ha vist en l'anterior capítol com els sistemes diferencials milloren l'exactitud dels GNSS, però presenten un inconvenient, perden exactitud a mesura que el receptor s'allunya de la estació base que envia les correccions. Existeix una alternativa que no depèn de que el receptor estigui pròxim a la estació base per poder aplicar les correccions.

L'any 1993 les Forces Armades d'Estats Units van implementar un sistema anomenat SBAS (Satellite-Based Augmentation System). Aquest sistema es va dissenyar per augmentar la constel·lació de satèl·lits i enviar informació procedent de satèl·lits geostacionaris. Aquesta informació que emeten són correccions diferencials i d'aquesta manera incrementen l'exactitud de les mesures dels receptors.

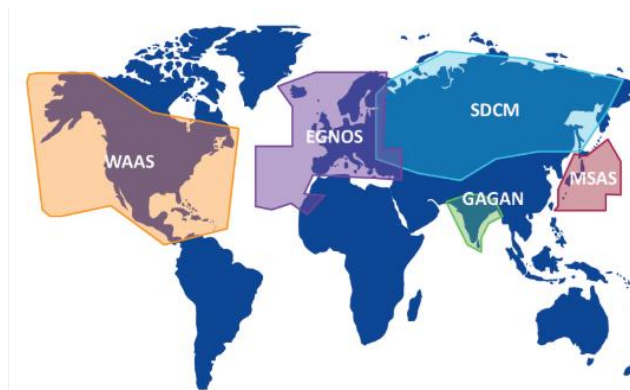


Figura 5.3: SBAS i les regions en les que es troben [38]

Els SBAS és un sistema de correcció dels senyals GNSS que transmeten al receptor, mitjançant satèl·lits externs i proporcionen les correccions a determinades regions de la Terra. Aquest sistema està format per una xarxa d'estacions terrestres anomenades *Ground Based Augmentation System* (GBAS) que realitzen de manera conjunta un missatge diferencial i la implementació de models més detallats per tal d'obtenir major exactitud a

través d'un enllaç VHF. A més, estudia la fiabilitat i continuïtat de la senyal GNSS i la qualitat del senyal en el territori implementat monitoritzant els satèl·lits.

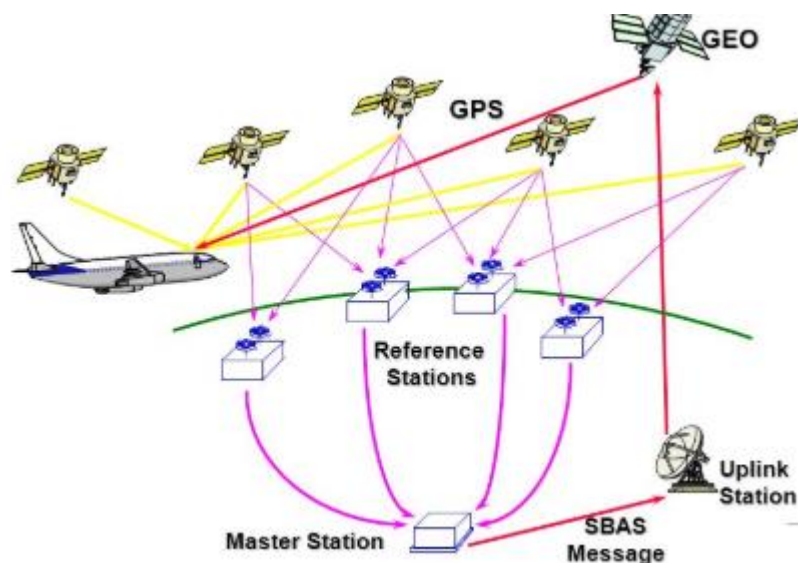


Figura 5.4: Funcionament SBAS

5.3.1 EGNOS

Va ser dissenyat i desenvolupat amb l'objectiu de millorar les exactituds dels GNSS a Europa. El servei European Geostationary Navigation Overlay Service Open Service (*EGNOS OS*) està disponible des de l'1 d'octubre de l'any 2009 i està disponible per qualsevol receptor GPS compatible amb aquest servei i que estigui dins de l'àrea EGNOS Open Service.

EGNOS fa mesures dels senyals GNSS que realitzen estacions de referència ubicades per tota Europa. Tots els errors que mesuren aquestes estacions són transmesos a un centre de computació on es calculen les correccions diferencials i els missatges d'integritat. Aquests càlculs es transmeten als satèl·lits geostacionaris i aquests els transmeten en la banda L1 (1575,42 MHz) en l'àrea que cobreixen i serveixen com a millora del senyal GPS original.

Aquest servei millora l'exactitud en la localització gràcies a les correccions que envia EGNOS als receptors. Aquestes correccions mitiguen l'efecte dels rellotges dels satèl·lits, errors orbitals i els provocats per la ionosfera. Les altres fonts d'errors que també afecten al senyal i s'han estudiat anteriorment (troposfera, multipath, dependents del receptor) al ser efectes locals i dependents de l'entorn, no poden ser corregides per EGNOS.

A més, EGNOS millora la fiabilitat de la informació de posicionament GNSS, al mateix temps que proporcionen un missatge d'integritat que serveix per saber la continuïtat i disponibilitat d'una senyal. EGNOS es capaç de monitoritzar la constel·lació dels GNSS per detectar errors i garantir al usuari que la informació que està rebent és de total confiança.

Gràcies a la web d'EGNOS, és possible visualitzar la millora en l'exactitud de les mesures gràcies al sistema EGNOS Open Service junt amb el GPS i comparar-lo amb el posicionament que ofereix únicament el GPS.

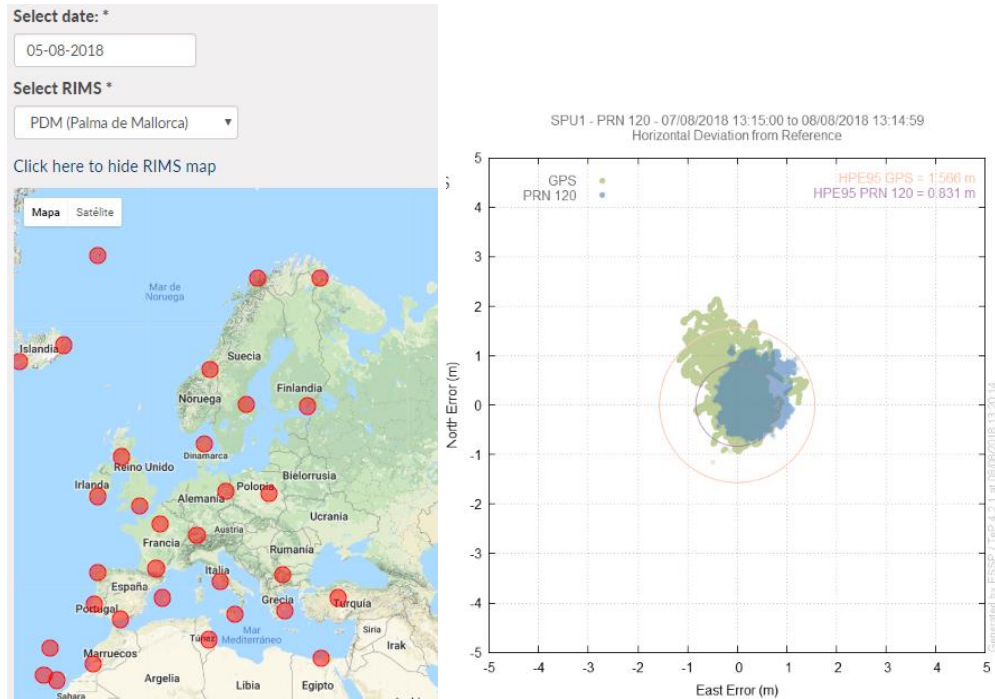


Figura 5.5: A l'esquerra es pot veure les diferents estacions que s'encarreguen de fer mesures dels senyals. A la dreta, la projecció en el pla horitzontal (R95) de la posició obtinguda per un receptor GPS (verd) i un receptor GPS+EGNOS(blau) [16]

En la següent figura es pot veure la projecció en el pla horitzontal (R95¹⁷) de la posició del receptor al llarg de les 24 hores del dia. R95 és un altre tipus de paràmetre estadístic que indica el CEP (Circular Error Probable) i indica el radi on les mesures estaran el 95% del temps.

La posició de referència del receptor és a l'origen (0,0). El color verd representa la desviació horitzontal en el cas de fer servir el sistema GPS mentre que el color blau representa la desviació horitzontal quan el sistema GPS fa servir les correccions que envia EGNOS.

Vol dir que el 95% del temps els valors que calculi el receptor estaran dins dels radis indicats. Es pot apreciar que el valor de HPE del sistema GPS+EGNOS és menor (0,83 m) que el valor calculat per el sistema GPS convencional (1,56 m).

Es pot concloure que les mesures fetes amb el sistema GPS+EGNOS s'obtidran com a resultat que la posició real del receptor està dins d'un radi de 0,83 m el 95% del temps, un radi la meitat de petit que en el sistema GPS

¹⁷ R95: paràmetre estadístic que indica el radi de l'error el 95% del temps

convencional, fent que el sistema EGNOS millori aproximadament el doble l'exactitud de les mesures fetes per el sistema GPS. Tenir alta exactitud vol dir que els valors que obtinguem utilitzant els dos sistemes junts seran molt propers al valor real, és a dir, que el seu cercle serà de radi més petit. (Annex A)

5.4 Projecte InLANE

InLANE és un projecte liderat per la companyia Vicomtech i fundada per l'agència GNSS europea i va començar 1 de gener de l'any 2016 i va finalitzar el 30 de juny de l'any 2018. Aquest projecte té com a objectiu proporcionar bones exactituds en el posicionament (lane-level) que garanteixin la seguretat en la conducció mitjançant sensors de baix cost. El passat 19 de juny de l'any 2018, en la RACC de Barcelona, es va dur a terme l'esdeveniment final d'aquest projecte fent les demostracions.

La finalitat del projecte INLANE és reduir els costos dels sensors en un cotxe autònom i a la vegada garantir una alta exactitud en les mesures. Si es fessin servir tècniques diferencials com el DGPS o RTK s'augmentaria considerablement el preu d'un cotxe autònom ja que s'haurien d'instal·lar estacions base cada certs kilòmetres i dotar als cotxes de receptors capaços de processar aquest tipus de senyals. Aquestes tècniques ens proporcionen exactituds de pocs centímetres però a costa d'un alt preu. Vicomtech va plantejar la possibilitat d'oferir exactituds suficients a un cost molt més reduït a base de fer servir diferents tècniques que es comentaran a continuació. Reduir el preu considerablement en els sensors farà que els cotxes autònoms siguin accessibles per a més clients que no pas si es fessin servir sensors que encareixin el cotxe autònom.

A continuació es parlarà dels sensors que fan servir en el projecte InLANE per proporcionar una bona exactitud i seguretat en la conducció autònoma.

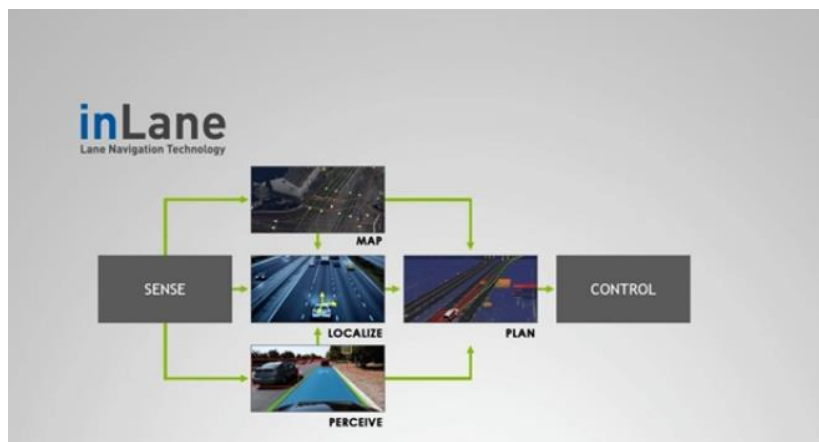


Figura 5.6: Funcions del projecte InLANE

5.4.1 GNSS + EGNOS

Si es fa servir el sistema GPS convencional sense aplicar cap tipus de mètode que ens proporcioni millores en l'exactitud els resultats no són suficients per al posicionament absolut del cotxe autònom. El projecte INLANE fa servir receptors de multi constel·lació que, com ja s'ha vist, proporcionen millor exactitud i disponibilitat. La finalitat del projecte és fer servir el senyal Galileo ja que quan estigui fet tot el desplegament i estiguin operatius tots els satèl·lits de la seva constel·lació proporcionarà millors exactituds en el posicionament. A més, el receptor serà capaç de processar senyals GPS, per tant es tracta d'un receptor multi constel·lació.

En comptes de fer servir tècniques com el DGPS o RTK per millorar l'exactitud, els receptors GNSS que es fan servir en el projecte INLANE podran rebre les correccions que proporciona el SBAS EGNOS. D'aquesta manera, com em vist en l'anterior capítol, fent servir el sistema Galileo+EGNOS es millorarà l'exactitud de les mesures. S'espera que la exactitud el 95% del temps en la posició horitzontal fent servir el GNSS+EGNOS serà aproximadament de 0,50 m.

Cal tenir en compte que aquests sensors ens proporcionen una posició absoluta però també és necessari conèixer la posició relativa i aquesta dada ens la proporcionarà un altre sensor.

5.4.2 Sensors IMU low-cost

Com ja s'ha vist en el capítol 2, aquests sensors IMU s'encarreguen de mesurar canvis de posició i velocitat del cotxe. Aquest sensor proporciona una aproximació de la posició i velocitat del cotxe durant un cert temps en cas de que es perdi el senyal GNSS, per exemple, dins d'un túnel.

5.4.3 Visió computacional

La visió computacional realitzarà dues funcions: la percepció i la localització. Es disposa d'una càmera frontal que s'encarrega d'analitzar les característiques de la via, tals com les línies dels carrils, senyals de tràfic i demés.



Figura 5.7: Detecció de senyals de tràfic

Aquesta càmera, mitjançant un altre algoritme, realitzarà la tècnica d'odometria visual. Aquesta tècnica consisteix en estimar la posició i orientació del cotxe, obtenint una trajectòria del seu recorregut analitzant les imatges que obté frame a frame i comparant-les. D'aquesta manera s'extrau informació amb la variació entre imatges, estimant quant s'ha desplaçat el cotxe. Gràcies a aquesta tècnica ens proporciona la posició relativa del cotxe.



Figura 5.8: Detecció de línies de carril i mesures de la posició relativa del cotxe respecte l'entorn

També presenta un software de navegació que fa servir la càmera frontal. S'encarrega de detectar les línies de la carretera i revisa les coincidències en temps real amb les línies de la carretera del seu mapa intern. Una altre objectiu és que permeten actualitzacions automàtiques dels mapes.

L'esdeveniment va concloure assegurant que es pot arribar a obtenir una exactitud en la posició horitzontal al voltant de 0,50 m fent servir sensors de baix cost. D'aquesta manera volen evitar l'ús de sensors que encareixin el cotxe autònom i eliminar sensors redundants.

6. CONCLUSIONS I TREBALLS FUTURS

6.1 Conclusions

Un cop realitzat aquest treball s'ha pogut veure com els cotxes autònoms disminueixen la distància de seguretat respecte un cotxe convencional. La millora del temps de reacció d'aquests cotxes en comparació al temps de reacció d'un humà disminuirà el nombre d'accidents en les carreteres i millorarà el tràfic ja que es podrà mantenir una distància de seguretat tal que optimitzi la circulació en les carreteres.

S'ha analitzat i comprés el funcionament dels actuals sistemes de posicionament, especialment el sistema GPS. S'ha estudiat com el receptor és capaç de calcular la distància que el separa dels satèl·lits, com calcula la seva posició i com els senyals es veuen afectats a causa de diferents fonts d'error. Per cada font d'error s'ha estudiat i comptabilitzat l'error en metres que introdueixen per tal de veure quin és el més significatiu.

Existeixen diferents tècniques per tal de millorar l'exactitud de les mesures dels GNSS, que s'han estudiat i comprés el seu funcionament. Gràcies a haver pogut assistir al esdeveniment *InLANE* es va poder veure l'enfocament dels sensors de posicionament per els cotxes autònoms. La tendència que tindran els cotxes autònoms és la de fer servir (a Europa) el sistema GNSS Galileo ja que, com s'ha pogut estudiar en aquest treball, aquesta senyal és molt més robusta enfront al multipath que el senyal GPS i per al cotxe autònom és molt interessant mitigar l'efecte d'aquesta font d'error.

Es conclou que els GNSS actuals no compleixen amb els requeriments de posicionament per el cotxe autònom i s'ha pogut estudiar quina seria la tendència a seguir en el posicionament d'aquest sector. Utilitzar tècniques diferencials no és la solució òptima per aquest sector ja que proporcionen exactituds de centímetres però es necessiten estacions base cada certs kilòmetres. Aquestes tècniques poden ser útils per a altres sectors, però per el cas del cotxe autònom no és necessari obtenir exactituds de pocs centímetres i la tècnica que més encaixa en els sector del cotxe autònom és fer servir les correccions EGNOS junt amb el sistema Galileo un cop estigui completament operatiu.

6.2 Treballs futurs

Un cop s'ha realitzat aquest *TFG* i s'han extret les conclusions, es pot plantejar la possibilitat de continuar aquest treball. Amb la realització d'aquest treball, s'ha pogut estudiar i demostrar que les exactituds que ens proporciona un sistema GPS convencional no són suficients per el posicionament del cotxe autònom ja que s'han estudiat les diferents fonts d'error i s'han quantificat. El posicionament és un aspecte fonamental per al cotxe autònom i es considera que si s'hagués de seguir amb aquest treball també s'ha d'enfocar en el mateix aspecte.

Es considera que seria molt interessant fer el mateix estudi però de manera pràctica, és a dir, prendre mesures reals en un entorn urbà mitjançant un receptor GPS i veure les principals diferències en el posicionament comparant-lo en un entorn sense multipath. S'ha demostrat que el multipath és la font més problemàtica per al cotxe autònom ja que aquest sempre estarà en constant moviment i els senyals GPS que rebí en una ciutat probablement vinguin retardades per les reflexions dels senyals.

La tendència en posicionament per al cotxe autònom, com ja s'ha dit, serà utilitzar el senyal Galileo i les correccions EGNOS. Seria molt interessant prendre mesures reals del senyal GPS+EGNOS i comparar-la amb el senyal GPS sense correccions. Un cop estigui fet tot el desplegament de la constel·lació Galileo l'any 2020 l'estudi el centraria només amb el senyal Galileo ja que serà la que s'utilitzi a Europa.

Així doncs, la continuació d'aquest *TFG* hauria de servir per acabar de comprendre com el senyal d'un sistema GNSS és deteriorada a causa de les diferents fonts d'error.

7. Annex A: GPS

En aquest annex s'explica de manera més detallada el sistema GPS com els segments que el formen.

9.1 Segments

Segment espacial

La constel·lació GPS està nominalment formada per 24 satèl·lits (actualment són 31) operatius distribuïts en 6 plans orbitals amb una inclinació de 55° respecte l'equador. Es troben a una altitud de 20200Km i les òrbites són gairebé circulars amb un període de 11 hores, 58 min i 2 segons.

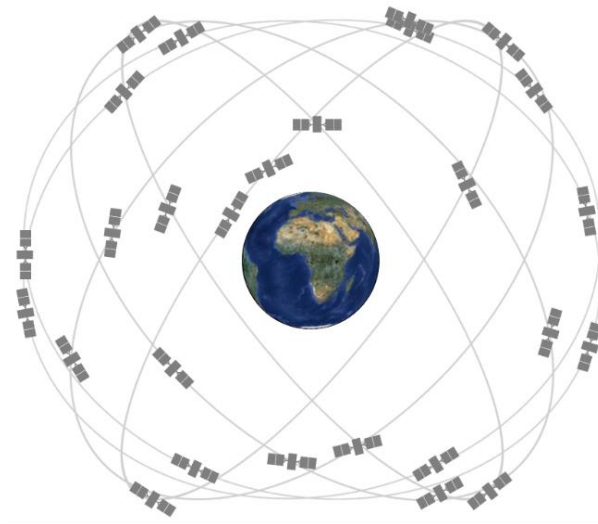


Figura 7.1: Constel·lació nominal del GPS

Degut a la irregularitat de la Terra, produeix variacions de la gravetat que afecta a les òrbites dels satèl·lits així com les seves trajectòries a causa de possibles marees gravitatòries causades per la Terra, la Lluna i el Sol.

A causa d'aquests possibles errors de la òrbita del satèl·lit, és de vital importància fer un seguiment continuat des de diferents estacions de terra. Aquestes estacions formen el Segment de Control. Un cop tenen informació sobre les posicions, trajectòries i derives, s'emeten dins del missatge GPS permetent conèixer la posició actual i les correccions orbitals. Aquests satèl·lits tenen rellotges atòmics ja que proporcionen una alta estabilitat i és de vital importància mantenir la referència temporal sincronitzada.

Els rellotges dels satèl·lits són en realitat oscil·ladors atòmics que, gràcies a la seva alta freqüència i gran estabilitat de la mateixa, permeten efectuar mesures de temps amb una precisió molt elevada. Aquests rellotges s'ajusten periòdicament respecte els rellotges d'Hidrogen que es troben en terra. La estabilitat es caracteritza per el valor $\Delta f / f$, on Δf indica la variació de freqüència possible en un període determinat i f ens indica la freqüència del rellotge.

Tabla 7.1: Estabilitat rellotges atòmics

Tipus de rellotge	Estabilitat diària ($\Delta f / f$)	Temps que triga en desviar-se un segon
Cristall de quars	10^{-9}	30 anys
Rubidi	10^{-12}	30000 anys
Cesi	10^{-13}	300000 anys
Hidrogen	10^{-14}	30000000 anys

Segment de control

El segment de control del GPS el forma una estació anomenada Master Control Station (MCS), Monitor Stations i Ground Antennas. La MCS es troba en la base de les forces aèries d' Estats Units a Colorado Springs, mentres que les estacions de monitorització es troben en Hawaii, Kwajalein, Diego Garcia, Ascension i a Colorado Springs.

La MSC és el centre de control general del sistema GPS. Aquest centre s'encarrega de monitoritzar i mantenir l'estat dels satèl·lits, monitoritzar les seves òrbites. També s'encarrega d'estimar els paràmetres de les efemèrides i dels rellotges dels satèl·lits mantenint la sincronització amb el UTC. A més, és l'encarregat de generar els missatges de navegació que posteriorment els satèl·lits enviaran cap als receptors de la Terra. Envia les correccions necessàries mitjançant un enllaç en banda S per ser incorporades en el missatge de navegació transmès per cada satèl·lit. A més, és el responsable de detectar errades i proporcionar solucions, i el manteniment dels satèl·lits.

L'objectiu de les Monitor Stations és rebre totes les senyals que transmeten els satèl·lits i comprovar la seva posició, velocitat i òrbita dels satèl·lits i recol·leccions de dades atmosfèriques.

Per últim trobem un Prelaunch Compatibility Station (PCS) a Cape Canaveral, EEUU, i un sistema de back-up per la MCS.

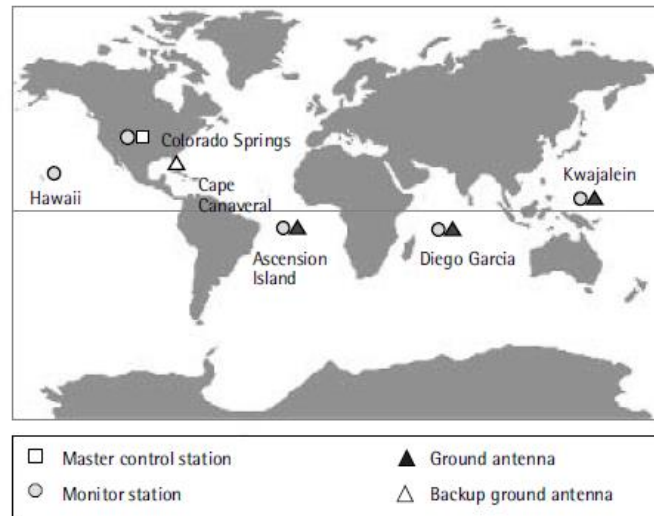


Figura 7.2: Estacions de control GPS

Les correccions, són transmeses a cada satèl·lit utilitzant les tres antenes de terra que em parlat anteriorment. Aquestes antenes també són utilitzades per rebre i transmetre una altra informació de control. La informació és transmesa en la banda S, a 1,783.74 MHz uplink i a 2,227.5 MHz downlink (**Figura 7.3**)

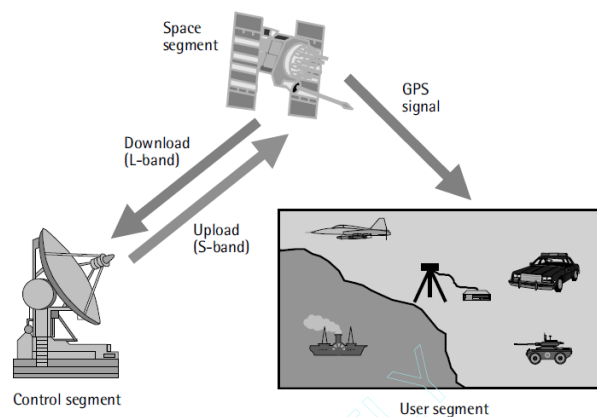


Figura 7.3: Transmissions entre segments GPS

Les dades GPS són captades per les estacions de control i enviades al MCS per ser processades. Un cop aquestes dades són processades obtindrem, entre d'altres, informació sobre la posició dels satèl·lits en funció del temps, paràmetres dels rellotges dels satèl·lits, informació sobre l'atmosfera, entre d'altres. Aquesta informació de navegació és enviada cap a una estació de control i aquesta l'envia als satèl·lits GPS mitjançant un enllaç en banda S.

És molt important mantenir la referència temporal sincronitzada entre els rellotges de terra i dels satèl·lits. Per això, els satèl·lits GPS tenen rellotges de

Cesi, Rubidi i s'ajusten periòdicament respecte els rellotges d'hidrogen que es troben a terra.

Segment d'usuari

El segment d'usuari és el format per els receptors GPS. La seva principal funció és rebre les senyals GPS procedents dels satèl·lits per tal de determinar les pseudo distàncies i resoldre les equacions de navegació per tal d'obtenir les seves coordenades.

9.2 Taula resum

Tabla 7.2: Característiques sistema GPS

Paràmetre	Detall	GPS
Satèl·lits	Número de satèl·lits (nominals)	21+3 repost
	Número de plans orbitals	6
	Radi de la òrbita (Km)	26,560
Senyal	Tècnica separació de senyal	CDMA
	Freqüència portadora (MHz) – L1	1575,42
	Freqüència portadora (MHz) – L2	1227,60
	Code Clock rate (MHz) – C/A	1,023
	Code clock rate (MHz) - P	10,23
	Tècnica per especificar les ephemeris del satèl·lit	Kleperian orbital elements
	Posició de referencia	WGS84
	Temps de referencia	UTC (USNO)

9.3 Indicadors de precisió

9.3.1 User Equivalent Range Error (UERE)

És un paràmetre que engloba a tots els errors que es produeixen en el senyal GPS. Es defineix com un vector sobre la línia vista entre el satèl·lit i l'usuari com a resultat de projectar sobre ella tots els errors del sistema.

Aquest error és equivalent per tots els satèl·lits i es tracta d'un error quadràtic mitjà. Durant un llarg període de temps, aquests errors es poden considerar que són aleatoris, tenint errors positius i negatius igual de probables, fent que el valor mitjà sigui zero.

Si dibuixéssim un gràfic que representés la freqüència en la que apareix un error estaríem representant una funció de densitat de probabilitat de forma Gaussiana com la de la figura X. La probabilitat que un error succeeixi amb un valor entre els límits especificats seria l'àrea que es troba a sota de la corba.

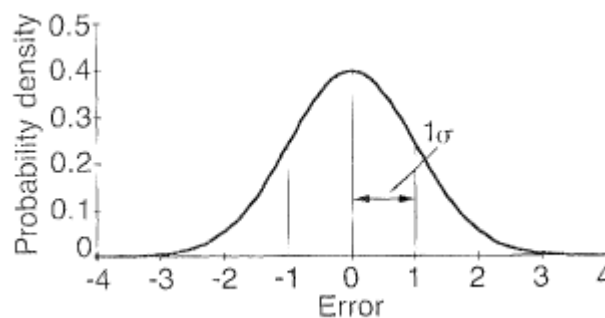


Figura 7.4: Funció de distribució de probabilitat del tipus Gaussiana

Per tal de poder quantificar la distribució o dispersió dels possibles errors en un número, s'utilitza el caràcter grec sigma (σ). Aquest valor (1σ) que es pot observar en la **Figura 8.4**, indica que l'àrea que es troba entre 0 i 1 indica un 68% de probabilitat que un error tingui un valor entre -1σ i 1σ . Es pot obtenir el valor de σ experimentalment si prenem un gran número de mesures i es calcula l'arrel quadrada de la suma de tots els errors que s'han mesurat al quadrat i divideixen entre el número de mesures que s'han fet, d'aquesta manera s'obté l'anomenat Root Mean Square (RMS) que donarà com a resultat el valor mitjà d'un error mesurat.

$$rms = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (7.1)$$

9.3.2 Dilution of Precision (DOP)

El paràmetre UERE únicament indica l'error en la distància entre el receptor i el satèl·lit. Si el que volem mesurar es l'error en la posició haurem de tenir en compte on estan els satèl·lits que estem rebent les senyals. La contribució de la geometria dels satèl·lits en els errors de posicionament s'anomena *Dilution of Precision* (DOP) i aquest valor s'ha de multiplicar per el valor obtingut de la UERE.

Per exemple, si tenim que per un receptor GPS estàtic el valor de la UERE és de 8,00 metres, i escollint un valor de HDOP de 1,5, llavors el 68% del temps, la precisió (nivell 1σ) en la posició serà de: $8 \cdot 1,5 \cdot 1 = 12$ m. En canvi, si el que volem és obtenir una precisió de nivell 2σ , voldrà dir que el valor serà el 95% del temps, haurem de multiplicar per 2. Per el cas anterior seria: 24m.

Amb les dades que em fet servir, els resultat que em obtingut volen dir que si volem obtenir una precisió al nivell 1σ sabrem que el 68% del temps la nostra posició estarà en un radi de 12 metres, en canvi, si el que volem és una - precisió a nivell 2σ vol dir que el 95% la nostra posició estarà en un radi de 24 metres.

9.3.3 Exactitud vs Precisió

No s'ha de confondre el terme precisió i exactitud ja que se sol confondre contínuament. La definició d'exactitud de les mesures del GPS es refereix al grau de proximitat que s'obté del valor mitjà mesurat a la posició real. En canvi parlem de precisió quan ens referim a la dispersió del conjunt de valors en les mesures. Quant més precises siguin les mesures menys disperses estaran entre elles.

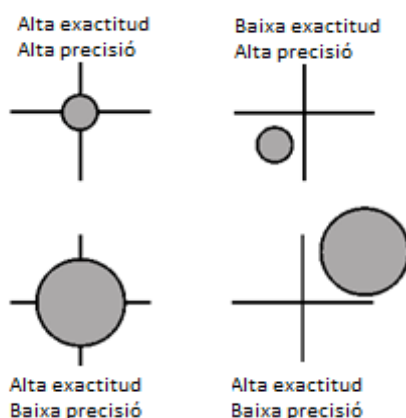


Figura 7.5: Comparació entre exactitud i precisió

9.4 SBAS-EGNOS

SBAS (Satellite Based Augmentation) és un sistema de correcció de senyals GNSS que transmet al receptor, mitjançant satèl·lits externs que proporcionen cobertura a regions concretes de la Terra. Aquest sistema és un estàndard, per tant es pot aplicar als diferents sistemes GNSS però se solen utilitzar en el sistema GPS i GLONAS.

Consisteix en una xarxa d'estacions terrestres que realitzen de manera conjunta un missatge diferencial i la implementació de models més detallats, amb l'objectiu de millorar la precisió. Aquestes correccions mitiguen l'efecte dels rellotges dels satèl·lits, errors orbitals i els provocats per la ionosfera

Les estacions de referència, que es troben distribuïdes per tota l'àrea del SBAS, reben les senyals GNSS i les envien a la *Master Station*. Les correccions són enviades al satèl·lit SBAS i posteriorment aquest l'enviarà als receptors que es trobin en l'àrea del SBAS. Els receptors capaços d'utilitzar aquesta senyal, seran capaços d'aplicar-la per millorar el càlcul del posicionament.

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) va ser creat per la *European Space Agency*, conjuntament amb la Comissió Europea (EC) i EUROCONTROL (*European Organization for the Safety of Air Navigation*).

El sistema EGNOS compte amb 3 satèl·lits que cobreixen Europa. S'encarrega de transmetre correccions diferencials d'ús públic.

El senyal EGNOS està disponible el 99% del temps i millora la posició del senyal GPS fins a 1 metre. Aquest sistema, junt amb Galileo, formen les dos majors iniciatives europees en termes de navegació per satèl·lit.

El segment terrestre de EGNOS està format per una xarxa d'estacions RIMS (Ranging Integrity Monitoring Stations), quatre MCC (Mission Control Centres), sis NLES (Navigation Land Earth Stations) i la xarxa d'àrea més extensa EGNOS que proporciona la xarxa de comunicació per a tots els components del sistema terrestre.

Actualment la xarxa d'estacions RIMS està formada per 39 estacions distribuïdes per la superfície terrestre. La seva funció principal és la de recollir dades dels satèl·lits GPS i transmetre'ls a les instal·lacions centrals de processat (CPF, Central Processing Facilities) de cada MCC. Les CPF són un mòdul de les MCC que utilitzen les dades rebudes de la xarxa d'estacions RIMS per elaborar les correccions de rellotge per cada satèl·lit GPS, corregir les efemèrides per millorar la posició orbital de cada satèl·lit i elaborar un model d'error ionosfèric sobre l'àrea de servei EGNOS. Aquestes correccions s'envien al usuari per millorar la precisió en el seu posicionament.

El segment espacial està format per tres satèl·lits geostacionaris que envien informació sobre les correccions i la integritat per als satèl·lits GPS. La idea de EGNOS és de que al menys siguin visibles dos dels tres satèl·lits EGNOS

encara que només amb un seria necessari per rebre les correccions necessàries.

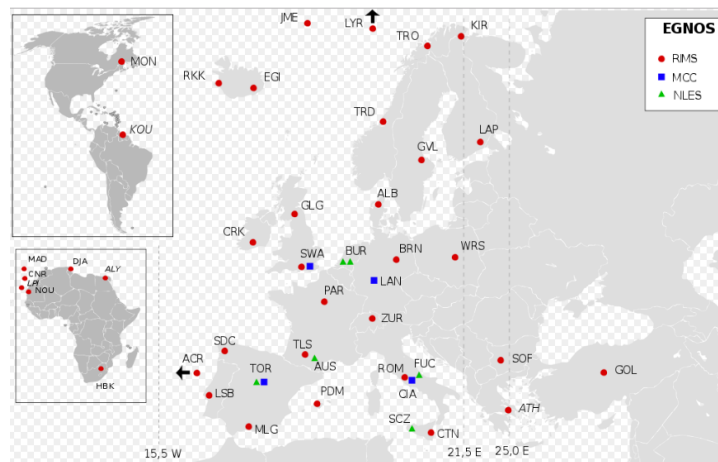


Figura 7.6: Estructura de les estacions EGNOS

8. Annex B: Galileo

Tal i com em parlat en els anteriors capítols, ara descriurem els diferents segments que formen aquest GNSS.

- Segment Espacial

El segment espacial planificat de Galileo constarà de 30 satèl·lits, distribuïts en tres plans dels quals 3 seran de repost. Estaran situats a una alçada de 23222 Km, amb una inclinació de 56°.

El primer satèl·lit que es va llançar al espai va ser l'anomenat GIOVE-A (Galileo In Orbit Validation Element) el 28 de desembre de l'any 2005. Va ser desenvolupat per la ESA i va començar a transmetre senyals de manera exitosa el 12 de gener de 2006. Aquestes senyals van servir, entre altres motius, per verificar les tecnologies desenvolupades i la caracterització dels senyals enviades.

El 15 de desembre del 2016 va ser quan va començar a oferir els seus serveis però amb la combinació de GPS i GLONASS ja que la constel·lació de satèl·lits no està acabada.

Actualment hi ha un total de 22 satèl·lits en òrbita, encara que alguns d'ells no estan operatius actualment però es reemplaçaran en poc temps. El següent llançament de satèl·lits està previst en aquest Juliol amb 4 nous satèl·lits. Amb els nous llançaments dels satèl·lits restants es pretén ampliar la capacitat de la constel·lació i d'aquesta manera millorar tant el rendiment com la disponibilitat del sistema en tot el planeta. Està previst acabar la constel·lació entre l'any 2020 i 2021.

- Segment de Control

El segment de control de Galileo s'anomena GCS (Ground Control Segment). Té la mateixa funció que el segment de control d'un GNSS general, i és el responsable del manteniment de la constel·lació Galileo durant el seu correcte funcionament. Per tant, entre altres funcions, controla el correcte funcionament dels satèl·lits, la sincronització del temps i envia missatges de navegació a través d'un uplink. Per dur a terme aquestes funcions són necessaris els següents elements:

- GSS (Galileo Sensor Stations): proporcionen la posició de cada satèl·lit d manera instantània, aproximadament són 30.
- ULS (Up-link Local Station): són 9 estacions equipades cadascuna amb 4 antenes que treballen en la banda-C. Aquestes antenes s'encarreguen d'enviar el missatge de navegació i les dades d'integritat del centre de control als satèl·lits..

- TT&C (Telemetry, Telecommand and Control): són estacions equipades amb antenes que treballen en la banda-S encarregades de proporcionar un intercanvi segur de dades entre els centres de control i els satèl·lits.
- GCC (Galileo Control Centre): és el centre del segment de control. És on tota la informació que proporciona el GSS és processada i s'encarrega de generar el missatge de navegació i les correccions necessàries que posteriorment li donarà als ULS.



Figura 8.1: GMS i GCS de Galileo

- Segment d'usuari

Tal i com em comentat anteriorment, el servei Galileo no està completament acabat. No obstant això, s'han començat a comercialitzar smartphones compatibles amb el servei Galileo i el primer a fer-ho va ser la marca espanyola BQ.

Quan Galileo sigui totalment funcional, els receptors GNSS seran capaços de combinar les senyals Galileo, GPS i GLONASS per tal de millorar una posició molt més precisa.

9. Annex C: *Sldemo_absbrake*

Per poder fer el càlcul de la distància de seguretat mínima necessitem saber la distància de frenada. Al ser un valor que depèn de diferents factors, tals com l'estat del paviment, estat de les rodes, etc.. No podem utilitzar valors teòrics i s'ha de fer servir un software que simula el frenat d'un cotxe.

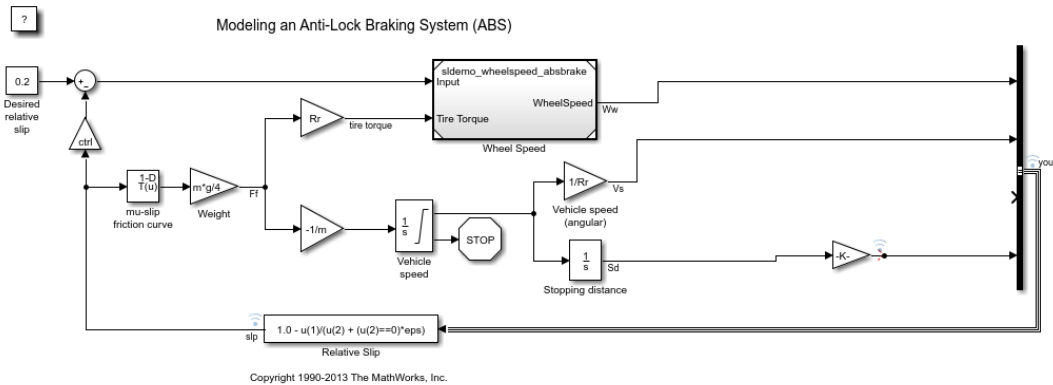


Figura 9.1: Diagrama de blocs Anti-Lock Braking System

Per poder accedir s'ha d'escriure *SLdemo_absbrake* en la línia de comandes de *Matlab*. Com podem observar en la **Figura 9.1** apareixen diferents blocs, però nosaltres ens centrarem en el Stopping Distance(m). El software té uns valors per defecte de les variables que intervenen en la simulació de la distància de frenat i són els següents:

Name	Value
I	5
Kf	1
PBmax	1500
Rr	1.25
TB	0.01
ctrl	1
g	32.18
h	<1x1 matlab.ui.Figure>
m	50
mu	[0 0.4 0.8 0.97 1 0.98 0.96 0.94 0.92 ..
sldemo_absbrake_output	<1x1 Simulink.SimulationData.Dataset..
slip	[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4..
v0	88

Figura 9.2: Valors per defecte

El resultat de fer la simulació serà una gràfica que ens dirà quanta distància recorre el cotxe al frenar en una determinada velocitat que haurem de modificar del valor per defecte. El primer valor que haurem d'introduir i fer la simulació és de 30 Km/h, però s'ha de tenir en compte que aquest software no accepta

velocitats lineals sinó radials. Per tant, haurem de dividir la velocitat en m/s entre el radi de la roda, que ja ens ho indica el software:

$$V_o = \frac{V}{Rr} \quad (9.1)$$

$$V_o = \frac{V}{Rr} = \frac{8,33}{1,25} = 6,664 \text{ rad/s}$$

Per tant, els valors que haurem de fer servir per la simulació són els següents:

name	value
I	5
Kf	1
PBmax	1500
Rr	1.25
TB	0.01
ctrl	1
g	32.18
h	<1x1 matlab.ui.Figure>
m	50
mu	[0 0.4 0.8 0.97 1 0.98 0.96 0.94 0.92 ...
sldemo_absbrake_output	<1x1 Simulink.SimulationData.Dataset>
slip	[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4...
v0	6.664

Figura 9.3: Valors per simulació a 30 Km/h

10. Annex D: REMCOM

Aquest software ens ha permès realitzar un estudi de l'efecte multipath en un entorn urbà de manera pràctica. Per poder fer l'estudi, s'ha de configurar l'entorn urbà, tant el transmissor com el receptor i els punts on es faran les mesures del retard del senyal.

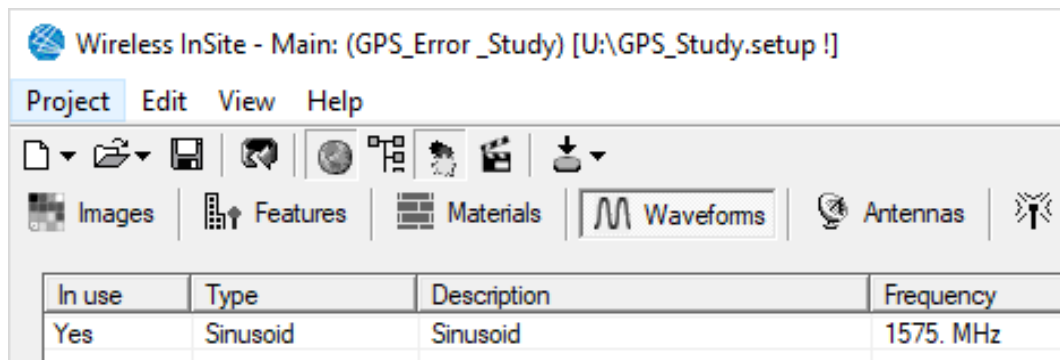


Figura 10.1: Configuració del senyal a transmetre (L1 GPS)

Un cop especificat la freqüència del senyal a transmetre, s'ha de configurar l'antena del transmissor (satèl·lit) i del receptor (cotxe). Es va fer servir un *half-wave dipole* ja que era el més senzill d'entre totes les antenes i es volia comparar els resultats entre dues antenes molt diferents (una senzilla i una millorada).

Materials

Waveforms

Antennas

Transmitters / Receivers

Study areas

Comm. systems

Output

Description	Type	No. points	Spacing	Power	Tx Antenna	Tx Waveform	Rx Antenna	Rx Waveform
GPS_Antenna	points	1	N/A	0.00 dBm	Half-wave dipole	Sinusoid	N/A	N/A
Receiving_Antenna (CAR)	points	10	N/A	N/A	N/A	N/A	Half-wave dipole	Sinusoid

Figura 10.2: Configuració del transmissor i del receptor

REMCOM et permet col·locar el transmissor on l'especifiquis, però en el nostre cas, hauríem de col·locar-lo a una alçada Z de 20200 Km. Per fer les simulacions no ens interessa col·locar-lo a una alçada tant elevada ja que augmentaríem considerablement el temps de càlcul. Vam decidir simplificar-ho ja que només volíem veure la millora en el retard entre les dues antenes i vam col·locar el transmissor a una alçada de 100 metres i centrat en l'escenari per facilitar la simulació:

View/edit vertices

Double-click to edit

X (m)	Y (m)	Z (m)
0	0	100

Figura 10.3: Posició del satèl·lit

Per últim, només hauríem d'indicar els punts on el cotxe es mourà i farem les mesures. Simplement s'ha de clicar en els llocs del terreny on volem col·locar els punts, en el nostre cas, s'ha realitzat amb 10 punts.

Double-click to edit

X (m)	Y (m)	Z (m)
0	0	2
4.72813238564569	-17.7304956117...	2
5.3191489338514	-34.2789581827...	2
5.9101654820571	-52.6004703148...	2
4.72813238564569	-70.9219824469...	2
-7.092198578468...	-81.5602798140...	2
-28.36879431387...	-88.6524780587...	2
-46.69030730825...	-89.83451109952	2
-68.55791959186...	-91.6075606606...	2
-86.28841603803...	-91.6075606606...	2

OK Cancel

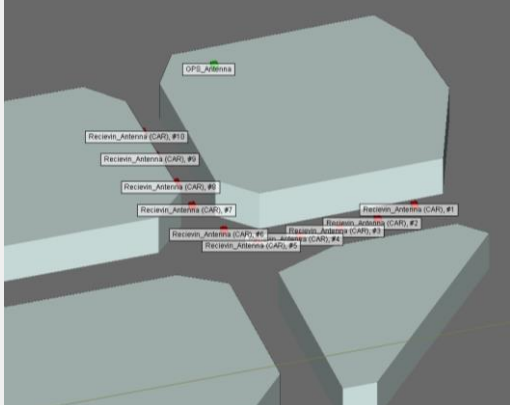


Figura 10.4: Punts on es mourà el cotxe i mesurarem els retards

Un cop definit totes les variables que necessitem, podem executar el software. REMCOM ens proporciona diferents dades tals com la potencia rebuda, el path gain, path loss i el que ens interessa per al nostre estudi: el Delay Spread. Quan REMCOM finalitzi el càlcul, ens ho indicarà i podem anar al desplegable: Point to multipoint/Delay spread/GPS_Antenna/Receiving_Antenna(CAR). Un cop arribat a aquest punt, fem click dret i seleccionem la opció:VIEW. Aquesta opció ens obrirà un .txt on apareixen les coordenades de cada un dels 10 punts, la distància que es troba del satèl·lit i el Delay Spread:

Project Edit View Help

GPS_Study.spread.t001_01.r002: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#Rx

#	X(m)	Y(m)	Z(m)	Distance(m)	DelaySpread(sec)
1	19.5035	97.5177	2	134.57	2.60158e-09
2	24.2317	79.7872	2	122.869	3.02927e-09
3	24.8227	63.2388	2	113.661	3.60085e-09
4	25.4137	44.9173	2	105.584	4.85663e-09
5	24.2317	26.5957	2	100.334	1.03628e-08
6	12.4113	15.9574	2	100.097	1.3714e-08
7	-8.86525	8.86525	2	105.519	4.94719e-09
8	-27.1868	7.68321	2	113.55	4.02809e-09
9	-49.0544	5.91017	2	126	3.05819e-09
10	-66.7849	5.91017	2	137.836	2.56227e-09

Figura 10.5: Obtenció del Delay Spread en tots els punts definits

Si analitzem el valor del Delay Spread en el punt 1 és la diferència entre el retard màxim del senyal que ha arribat en aquest punt menys el retard del senyal directe.

Per fer la segona simulació, varem tenir que dissenyar una antena nova amb un software anomenat: *FEKO* i aquest ens proporciona l'arxiu en format .uan.

Per poder carregar l'arxiu a REMCOM només s'ha d'anar a la part superior del menú on diu *Transmitters/Receivers* i seleccionar amb el botó dret el receptor i seleccionar *Tx/Rx properties*. Apareixerà un quadre on s'haurà de seleccionar l'opció *Receiver Properties* i un cop s'ingressa dins d'aquesta opció es seleccionarà la icona [...] que permetrà buscar i seleccionar la nostra antena en format .uan.

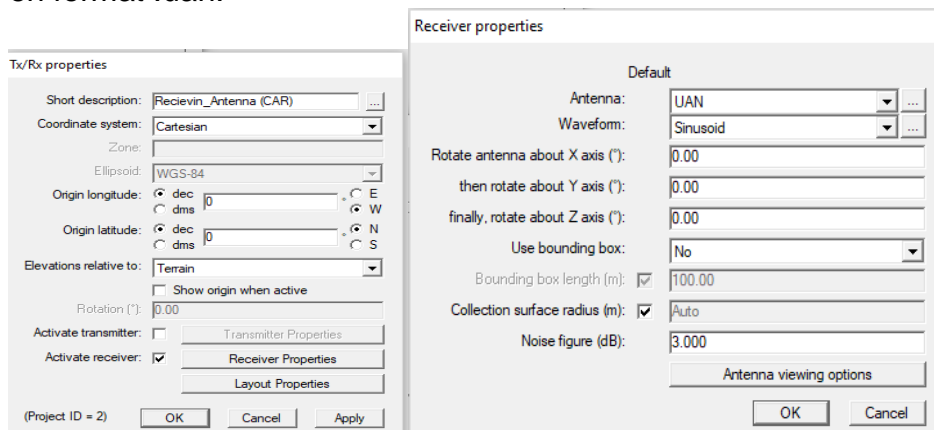


Figura 10.6: Procediment per carregar una antena en format .uan

Un cop fet es pot veure que s'ha carregat correctament:

ID	A	V	A	Tx	Rx	Description	Type	No. points	Spacing	Power	Tx Antenna	Tx Waveform	Rx Antenna	Rx Waveform
1	A	V		Tx		IGPS_Antenna	points	1	N/A	0.00 dBm	Half-wave di...	Sinusoid	N/A	N/A
2	A	V			Rx	!Recievin_Antenna (CAR)	points	10	N/A	N/A	N/A	N/A	UAN	Sinusoid

Figura 10.7: Característiques del transmissor i receptor

11. Bibliografia

- [1] <https://es.mathworks.com/help/simulink/examples/modeling-an-anti-lock-braking-system.html?requestedDomain=true>
- [2] Díez, K.; Modelado de trafico urbano de vehículos conectados
- [3] El-Rabbany, A., "Introduction to GPS", Cap.2 en "GPS Details", pp. 13-25, 2002
- [4] Lawrence R.Weill, California State University, "Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle", 4 (1997).
- [5] Shaoshan Liu, Liyun Li, Tie Jang, Shuang Wu and Ilean-Luc Gaudiot, "Creating Autonomous Vehicle Systems", Cap. 1 en "Introduction to Autonomous Driving".
- [6] <https://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg>
- [7] <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>
- [8] <https://www.gsa.europa.eu/egnos/what-egnos>
- [9] <https://es.wikipedia.org/wiki/EGNOS>
- [10] <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000064-a966faa5e7/TEMA7-Observables.pdf>
- [11] <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/section-1/>
- [12] <http://galileognss.eu/galileo-frequency-bands/>
- [13] <http://www.navipedia.net/index.php/Correlators>
- [15] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:907986/FULLTEXT01.pdf>
- [16] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/os_gps_egnos
- [17] https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/os_deviation
- [18] http://www.nstb.tc.faa.gov/reports/PAN96_0117.pdf#page=22
- [19] <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
- [20] <http://gpsworld.com/gnss-systemgalileogalileo-test-user-receiver-9772/>
- [21] <https://www.gsc-europa.eu/electronic-library/performance-reports>
- [22] https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-IS-OS-Quarterly-Performance_Report-Q1-2018.pdf

- [23] https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SDD.pdf
- [26] <https://slideplayer.com/slide/752289/2/images/7/SBAS+Architecture+GEO+GPS+Reference+Stations+Uplink+Station+SBAS.jpg>
- [27] <http://insidegnss.com/markets-and-multi-frequency-gnss/>
- [28] <https://www.machinedesign.com/motion-control/saved-sensor-vehicle-awareness-self-driving-age>
- [29] <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-1-gnss-overview/section-1/>
- [30] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message
- [31] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Baseband_Processing
- [32] <http://www.wirelessdictionary.com/Wireless-Dictionary-GPS-Errors-Definition.html>
- [33] Cardama, Á, Jofre, L, Rius J, Romeu J, Blanch S, Ferrando, M., “Antenas”, Cap.2 en “Propagación”, pp. 61-67, 2002
- [34] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tropospheric_Delay
- [35] Perdiguier, R., J. Zurutuza, M.C. Ruiz, M.J. Sevilla, Estrategias de cálculo del retardo troposférico y su influencia en procesamiento GPS de alta precisión, 2008.
- [36] Guochang Xu, GPS: Theory, Algorithms and Applications, 2nd Edition, Cap.5 en: “Tropospheric effects” pp 57-58
- [37] A. Pfadler, C. Ballesteros, J. Romeu, L. Jofre, "Vehicle Antenna Footprint Optimization for Efficient MIMO-V2X Communications", 10th Intern. Conf. on Adaptive and Self-Adaptive, Systems and Applications, Adaptive 2018, Barcelona
- [38] <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>
- [39] https://file.scirp.org/pdf/POS_2014021316044905.pdf